



# Optimisation thermoéconomique de la centrale d'incinération du Châtillon (FR)

Préparé par : Dr. Benoît Olsommer

Lausanne, août 1998

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVATIONS.....	1
1.2	BUTS, FINALITÉ.....	2
<b>2.</b>	<b>MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>3</b>
2.1	RÉSUMÉ DE LA MÉTHODOLOGIE [OLSOMMER, 1998].....	3
2.1.1	<i>Thermoéconomie: généralités</i> .....	3
2.1.2	<i>Méthode de modélisation et d'optimisation thermoéconomique</i> .....	4
2.1.2.1	Le modèle thermodynamique.....	4
2.1.2.2	Le modèle économique.....	6
2.1.2.3	Formulation du problème d'optimisation thermoéconomique.....	7
2.1.3	<i>Problématique mathématique</i> .....	8
2.1.4	<i>Procédure d'optimisation</i> .....	9
2.1.5	<i>Sûreté opérationnelle</i> .....	10
2.1.6	<i>Approche quasi-stationnaire et décomposition sur deux niveaux d'optimisation</i> .....	11
2.1.7	<i>Algorithmes génétiques</i> .....	11
2.1.8	<i>Application, remarques</i> .....	12
<b>3.</b>	<b>OPTIMISATION THERMOÉCONOMIQUE DE LA CENTRALE DE POSIEUX.....</b>	<b>13</b>
3.1	SUPERCONFIGURATION.....	13
3.2	MODÈLE ÉCONOMIQUE.....	15
3.2.1	<i>Principes de base</i> .....	16
3.2.2	<i>Composition des coûts totaux présents nets (<math>C_{tpn}</math>)</i> .....	18
3.2.3	<i>Coûts d'achat des équipements</i> .....	23
3.2.3.1	Fours d'incinération.....	24
3.2.3.2	Système de dépollution.....	24
3.2.3.3	Turbine à gaz.....	24
3.2.3.4	Turbines à vapeur.....	26
3.2.3.5	Bâche alimentaire.....	27
3.2.3.6	Fosse à déchets.....	27
3.2.3.7	Tuyauterie.....	28
3.2.4	<i>Coûts initiaux</i> .....	28
3.2.5	<i>Coûts opérationnels</i> .....	29
3.2.6	<i>Paramètres du modèle</i> .....	30
3.3	MODÈLE THERMODYNAMIQUE.....	32
3.4	MODÈLE DE SÛRETÉ DES SYSTÈMES.....	34
3.4.1	<i>Définition du problème</i> .....	34
3.4.2	<i>Procédures d'urgence</i> .....	35

3.4.3	<i>Flux réels</i> .....	36
3.5	MODÈLE THERMOÉCONOMIQUE .....	39
3.5.1	<i>Décomposition en séquences</i> .....	39
3.5.2	<i>Procédure d'optimisation à deux niveaux</i> .....	42
3.5.3	<i>Variables indépendantes et contraintes d'inégalité</i> .....	46
3.5.3.1	Variables indépendantes .....	46
3.5.3.1.1	Niveau structurel (L1) .....	46
3.5.3.1.2	Niveau opérationnel (L2) .....	49
3.5.3.2	Contraintes d'inégalité .....	50
3.5.4	<i>Dimensionnement des équipements</i> .....	51
3.6	SCÉNARIO .....	54
4.	<b>RÉSULTATS</b> .....	57
4.1	RÉSULTATS NUMÉRIQUES .....	57
4.1.1	<i>Analyse générale</i> .....	57
4.1.2	<i>Solution optimale</i> .....	61
5.	<b>CONCLUSION</b> .....	73
5.1	MÉTHODOLOGIE: .....	73
5.2	RÉSULTATS DE L'ÉTUDE: .....	74
5.3	PERSPECTIVES: .....	75
6.	<b>NOMENCLATURE</b> .....	77
7.	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	83
	<b>ANNEXE A.I: FONCTIONS DES COÛTS D'ACHAT DES ÉQUIPEMENTS.</b> .....	87
	<b>ANNEXE A.II: VARIABLES INDÉPENDANTES DE CONFIGURATION-DIMENSIONNEMENT (L1) DE LA DERNIÈRE GÉNÉRATION</b> .....	91

## 1. Introduction

Dans le cadre de la phase d'étude complémentaire pour l'élaboration du projet de l'usine d'incinération d'ordures de Châtillon (Posieux, FR), le Laboratoire d'Energétique Industrielle (LENI) de l'EPFL<sup>1</sup> a été mandaté par SAIDEF<sup>2</sup> en vue d'étudier et de confirmer le choix des principales options retenues pour la future usine. L'approche proposée consiste à trouver le minimum (au sens mathématique du terme (cf. chapitre 2.1)) des coûts totaux du système sur toute sa durée de vie, en considérant à la fois le choix de la configuration du système (planification des investissements, nombre d'équipements, connexions entre ces derniers, technologie), le dimensionnement des équipements, ainsi que les modes d'exploitation de la centrale.

### 1.1 Motivations

Les prises de décision associées aux choix de structure (configuration et dimensionnement) et d'exploitation (gestion opératoire) de telles installations sont extrêmement complexes, à cause, notamment, de la variation dans le temps de certains paramètres clés (e.g. quantité et qualité de déchets, tarifs énergétiques, demande énergétique, etc.). Pour les centrales d'incinérations d'ordures, le facteur temps ne peut souvent pas être négligé lors de la phase de conception (structure) de l'installation par le fait que les équipements fonctionnent souvent dans des régimes éloignés du point nominal avec des performances réduites. Pour trouver le meilleur concept qui satisfasse un ou plusieurs critères de décision (économique, environnemental, etc.), il convient de tenir compte des modes opératoires (gestion opératoire) afin de décider de la structure de l'installation, et vice-versa.

---

<sup>1</sup>Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

<sup>2</sup>Société anonyme pour l'incinération des déchets du Canton de Fribourg.

Les approches traditionnelles d'aide à la décision utilisées par les ingénieurs et les décideurs consistent souvent à procéder à une énumération restreinte de quelques alternatives et/ou à négliger le facteur temps. L'expérience a montré dans de nombreuses applications que ce type d'approches s'avèrent insuffisantes pour appréhender des problèmes de cette complexité et peuvent conduire à des prises de décisions qui ne sont pas optimales.

Les développements récents en matière de nouvelles méthodes et de nouveaux outils mathématiques d'aide à la décision appliqués aux choix ***simultanés*** de la structure (configuration et dimensionnement) et de l'exploitation (gestion opératoire) des systèmes énergétiques [Olsommer, 1997(a,b), 1998, 1999(a,b,c)] permettent, à l'heure actuelle, de traiter avec succès des systèmes aussi complexes que les centrales d'incinération d'ordures.

## 1.2 Buts, finalité

Dans le cadre de l'élaboration du projet de l'usine de Châtillon, l'application de la méthode d'optimisation développée dans [Olsommer, 1998] et résumée au chapitre 2, doit fournir aux responsables une aide substantielle aux diverses prises de décision d'ordres structurel et opérationnel.

L'étude a pour buts à la fois de confirmer certaines options (technologie, planification, exploitation) envisagées par SAIDF et de proposer, le cas échéant certaines variantes susceptibles de réduire sensiblement le coût de traitement des déchets. Parmi les options investiguées, l'étude montre notamment:

- la corrélation entre dimensionnements optimaux du (des) four(s) et de la fosse à déchets;
- l'opportunité et la date d'acquisition d'un appoint énergétique (turbine à gaz);
- l'opportunité de la présence d'une ou plusieurs lignes de turbines à vapeur;
- les modes d'exploitation (gestion opératoire) optimaux de l'usine.

## 2. Méthodologie

La méthodologie utilisée dans cette étude est tirée du travail de thèse de [Olsommer, 1998]. Les idées principales sont résumées brièvement dans ce chapitre. Pour les détails, le lecteur intéressé se référera au rapport de thèse [Olsommer, 1998].

### 2.1 Résumé de la méthodologie [Olsommer, 1998]

#### 2.1.1 Thermoéconomie: généralités

Les méthodes d'intégration énergétique des systèmes thermiques s'inscrivent dans le contexte actuel de préservation des ressources et de rationalisation de la production et de l'utilisation de l'énergie. Parmi elles, la **thermoéconomie** [Tribus, 1956, Evans, 1961, Gaggioli, 1977, von Spakovsky, 1994, Frangopoulos, 1994, Tsatsaronis and Pisa, 1994, Valero et al., 1994, El-Sayed, 1989, Olsommer et al., 1997, Curti, 1998, Pelster, 1998] est l'approche visant à combiner les principes énergétiques et les principes économiques pour pouvoir prendre des décisions rationnelles pour la configuration, pour le dimensionnement et pour le fonctionnement des systèmes énergétiques. La méthode d'optimisation thermoéconomique consiste à formuler l'objectif à atteindre (minimiser les coûts, par exemple) sous la forme d'une fonction mathématique (fonction objectif, notée  $F$ ) soumise à différentes contraintes (faisabilité technique ou de fonctionnement par exemple). La fonction est optimisée dans tout l'espace par rapport à ses variables d'optimisation (variables indépendantes, notées  $\mathbf{z}$ ) en recourant à des algorithmes mathématiques. Mathématiquement, les contraintes s'expriment sous forme de contraintes d'égalité (notées  $\mathbf{h}$ ), représentant les liens de causalité du système ou certaines conditions particulières, ou sous la forme de contraintes d'inégalité (notées  $\mathbf{g}$ ), caractérisant certaines limites ou restrictions. A ces relations mathématiques peut encore être ajouté un ensemble de relations logiques (notées  $\mathbf{L}$ ). Ces dernières sont formulées sous la forme de propositions logiques, exprimées au moyen d'"implications", de "et", "ou" et "ou exclusif". Finalement, le vecteur des variables indépendantes et le système d'équations défini par l'ensemble des contraintes et

expression logiques (**h**, **g**, **L**) détermine univoquement les inconnues du problème (appelées vecteur des variables dépendantes, noté **y**).

## 2.1.2 Méthode de modélisation et d'optimisation thermoéconomique

La méthode de modélisation et d'**optimisation thermoéconomique** développée dans ce travail est une approche générale permettant, lorsque la dépendance temporelle intervient, de répondre simultanément et de façon rationnelle aux questions fondamentales: (i) quand investir et réinvestir, (ii) comment et combien de composants choisir, comment les dimensionner et les connecter entre eux, (iii) comment opérer les différents paramètres de réglage. La démarche proposée se compose de trois étapes. La première (i) consiste à déterminer une **superconfiguration** du système regroupant un nombre fini d'alternatives susceptibles de répondre de façon satisfaisante au cahier des charges. Le **modèle thermoéconomique** est ensuite formulé (ii). Il se compose principalement du **modèle économique** (fonction objectif, coûts du système et paramètres économiques), des **paramètres d'optimisation** (variables indépendantes, contraintes) et du **modèle thermodynamique**. Ce dernier est constitué d'un modèle pour le dimensionnement du système et d'un modèle pour le fonctionnement (charges partielles). Le problème peut ensuite être résolu (iii) au moyen d'un **algorithme mathématique**.

### 2.1.2.1 Le modèle thermodynamique

Le modèle thermodynamique exprime à la fois les liens de causalité du système énergétique, et certaines conditions particulières, comme par exemple certaines prestations que le système doit remplir. Ils représentent les contraintes d'égalité du modèle thermodynamique (équation 2.2). Le modèle permet également d'exprimer certaines limites d'utilisation du système ou autres restrictions (contraintes d'inégalité, équation 2.3), et d'exprimer des expressions logiques (équation 2.4).

Le but du modèle thermodynamique est de pouvoir décrire le comportement du système (efficacités, débits, températures, pressions, etc.). Une façon d'y parvenir efficacement est d'avoir recours à une approche modulaire qui confère une certaine structure au modèle. Schématiquement, cette approche peut être décomposée en quatre niveaux (figure 2.1).



Système	Modèle
 <p>Superconfiguration</p> <p>Equipements</p> <p>Composants élémentaires</p> <p>Phénomènes</p>	<p>Assemblage d'équipements</p> <p>Assemblage de composants de base</p> <p>Bilans (géométrie, matériaux, fluides)</p> <p>Equations constitutives</p> 

Figure 2.1 - Approche modulaire pour la modélisation du système énergétique.

A partir de sa structure de base (superconfiguration), le système peut être décomposé en une série d'équipements, lesquels sont eux-mêmes constitués de composants élémentaires. Ces derniers sont le siège d'un ou plusieurs phénomènes physiques (convection, combustion, etc.) en fonction des propriétés thermophysiques des fluides intervenant. Le modèle du système est constitué à partir de la base. Les phénomènes sont représentés au moyen des équations constitutives. Ces différents modules sont ensuite sélectionnés pour constituer les composants élémentaires du système. Le principe de modélisation de ces derniers consiste à définir un volume de contrôle (frontière) de l'élément (figure 2.2), d'y associer ses différents paramètres intrinsèques (fluides de travail avec leurs propriétés thermophysiques, géométrie, matériaux), puis d'y appliquer les différents bilans fondamentaux (masse, quantité de mouvement, énergie, entropie). Ces modules de composants élémentaires peuvent ensuite être assemblés pour constituer les différents équipements du système. Enfin, le modèle du système est constitué en connectant les différents modules des équipements. Tout au long de cette étape de modélisation, les différents modèles sont validés au moyen de bases de données et/ou d'études paramétriques systématiques. Cette façon de formuler le modèle permet facilement d'apporter des modifications ultérieures à la superconfiguration par exemple.



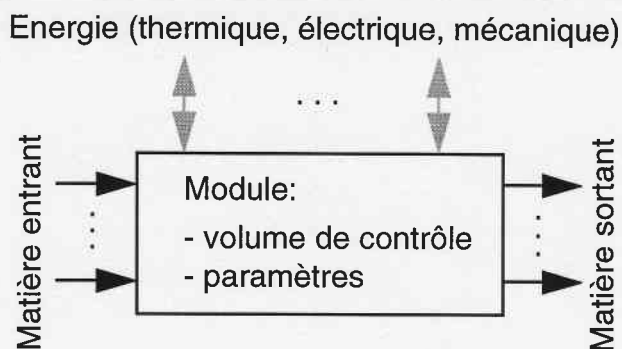


Figure 2.2 - Modèle schématique de représentation d'un (sous-) système.

(  $\rightarrow$  : flux de matière;  $\updownarrow$  : flux d'énergie)

### 2.1.2.2 Le modèle économique

De la même façon que le modèle thermodynamique permet de prédire le comportement physique du système, le modèle économique traduit ses performances économiques. Sans vouloir systématiser la modélisation du système économique, le modèle économique est caractérisé par les coûts associés au système. Ils se composent principalement des coûts liés à l'achat et à la construction du système, des coûts engendrés par les flux d'énergie et de matière entre le système et l'extérieur, des coûts liés à l'exploitation et à la gestion financière du système (cf. chapitre 3.2). Ces coûts s'inscrivent dans des conditions cadres, déterminées par certains paramètres financiers, comme les taux d'intérêt, les taux de changes, les coûts unitaires des matières premières et des produits, etc. (cf. chapitre 3.6). Les coûts s'expriment en fonction des variables dépendantes ( $y$ ) et indépendantes ( $z$ ) du système au moyen de relations mathématiques (contraintes d'égalité (équation 2.2)). Certaines restrictions économiques d'utilisation peuvent être exprimées sous forme de contraintes d'inégalités (équation 2.3) ou d'expressions logiques (équation 2.4). Le modèle économique, et spécialement les fonctions exprimant les coûts du système sont validées selon les procédures habituelles (bases de données du marché et/ou d'études paramétriques systématiques).

Si la thermodynamique peut être qualifiée de science exacte, il n'en va pas de même de l'économie. Ses mécanismes sont très complexes et caractérisés par un nombre important de paramètres particulièrement peu prévisibles. Ainsi, les prix des équipements, notamment, obéissent aux différents mécanismes du marché, comme la loi de l'offre et de la demande, la position du fournisseur sur le marché (monopole), ses stratégies en matière de marketing, sa situation financière, etc.. Pour cette

raison, il n'y a pas forcément de cohérence entre les prix de différents fournisseurs. Pour reprendre le cas des prix des équipements, l'ingénieur peut modéliser ceux-ci de deux façons:

- en prenant les prix des constructeurs à partir d'une base de données, si le problème est formulé de façon discrète (i.e. si les équipements sont choisis dans des catalogues);
- en constituant un modèle mathématique continu (fonction continue), exprimé en fonction des variables du système ( $\mathbf{z}, \mathbf{y}$ ) et de coefficients. Les coefficients du modèle sont ajustés par des procédés de régression, de façon à minimiser l'écart entre le modèle et une ou plusieurs bases de données. La précision des prix calculés de cette façon est souvent comprise dans une fourchette maximale de 5%. C'est cette approche qui est utilisée dans ce travail.

Compte tenu de la complexité des mécanismes économiques, les paramètres du modèle économique sont entachés d'incertitudes, tout spécialement lors de prévisions à long terme. Plusieurs auteurs proposent des formulations permettant d'en tenir compte [Wallace, 1996, Subrahmanyam, 1994, Ierapetritou, 1996]. Pourtant, la prise en compte des incertitudes peut passablement alourdir le modèle thermoéconomique, si bien que l'optimisation de ce dernier peut s'en trouver considérablement ralentie. Pour cette raison, ces aspects d'incertitudes des modèles ne sont pas prises en compte dans ce travail.

### **2.1.2.3 Formulation du problème d'optimisation thermoéconomique**

Le problème d'optimisation thermoéconomique consiste à minimiser la fonction objectif ( $F$ ) sur la durée de vie économique du système<sup>3</sup>. Le problème d'optimisation s'écrit comme l'intégrale de  $\dot{F}$  sur la durée de vie ( $\tau$ ) du système<sup>4</sup>:

---

<sup>3</sup>Lorsque la durée de vie économique du système est étendue à la durée de vie totale (extraction, fabrication, démantèlement, recyclage), on parle d'analyse portant sur le cycle de vie [White, 1997].

<sup>4</sup>Dans cette étude, la durée de vie choisie pour le système correspondra à l'horizon (durée de vie) économique, noté  $N_e$ .

$$\text{minimiser } F(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t) = \int_0^{\tau} \dot{F} dt \quad (2.1)$$

par rapport à  $\mathbf{z}$ ,  $t$

$$\text{sous contraintes} \quad \mathbf{h}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t) = \mathbf{0} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t) \leq \mathbf{0} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{L}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t) = \text{VRAI} \quad (2.4)$$

avec  $t$ , le temps.

### 2.1.3 Problématique mathématique

En raison de la nature des questions fondamentales liées à l'intégration des procédés<sup>5</sup> ainsi qu'à la nature même des systèmes (systèmes énergétiques), le modèle thermoéconomique est souvent non-linéaire (*NL*) et les variables indépendantes peuvent être de nature entières et/ou binaires (date d'acquisition d'un équipement, enclenchement ou déclenchement d'un équipement, par exemple) et/ou réelles (taille nominale d'un équipement, réglage d'une vanne de bypass) (*MI*). De ce fait, la formulation mathématique du problème d'intégration de ces systèmes est de type mixte entier-réel et non-linéaire (non-convexe) (*MINLP*), qui constitue la classe la plus difficile à résoudre d'un point de vue mathématique.

Il est possible de visualiser la problématique au moyen d'un graphique en trois dimensions pour le cas des systèmes énergétiques (figure 2.3). L'axe vertical représente le critère ou le but de l'optimisation comme, par exemple, la minimisation des coûts totaux présents nets, la minimisation des coûts d'investissements, la maximisation de l'efficacité, la minimisation de la consommation de fuel, la maximisation du rendement exergetique, la minimisation des irréversibilités, etc.. L'axe horizontal regroupe les variables de fonctionnement (opérations) en fonction desquelles les variations thermodynamiques de débit-masse, de température, de pression, etc. peuvent être variées dans la recherche de l'optimum. Le troisième axe

---

<sup>5</sup>Quand investir et réinvestir, comment et combien de composants choisir, comment les connecter entre eux, comment choisir les paramètres de dimensionnement des différents équipements, comment opérer les différents paramètres de réglage et autres politiques de fonctionnement au quotidien.

représente les niveaux de synthèse (configuration) et de conception (dimensionnement) qui appartiennent aux changements structuraux d'un système. Ces changements sont liés aux géométries, aux matériaux, aux dispositions des écoulements, etc. (conception) et à la configuration (synthèse) et peuvent également mener vers l'optimum.

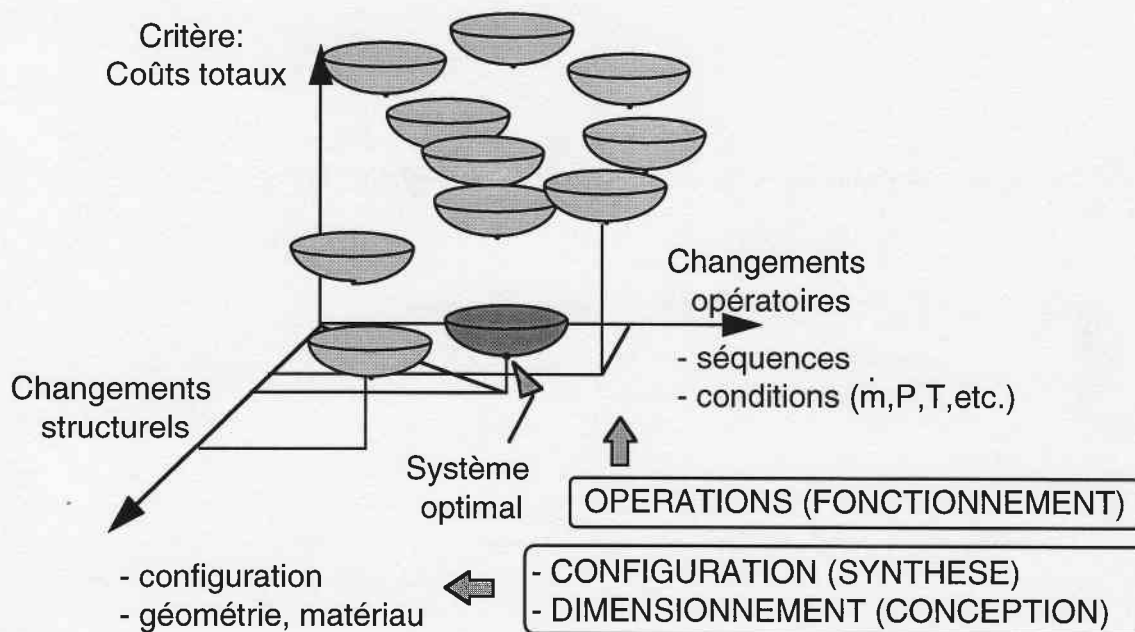


Figure 2.3 – L'espace des solutions de l'intégration des systèmes énergétiques<sup>6</sup>  
[von Spakovsky, 1997]

#### 2.1.4 Procédure d'optimisation

La procédure d'optimisation est, en général, une procédure itérative<sup>7</sup> (figure 2.4) dont les critères de convergence diffèrent d'une méthode à l'autre. Elle permet en principe de trouver la combinaison optimale des variables indépendantes qui donne le

<sup>6</sup>Notons que la forme convexifiée des différentes cuvettes n'est là que par souci de simplification de représentation. En réalité, ces cuvettes peuvent avoir des formes beaucoup plus accidentées, voir des discontinuités.

<sup>7</sup>La programmation géométrique par exemple (fonction objectif et contraintes constituées d'une somme de polynômes), permet de calculer directement la solution optimale par la résolution d'un système d'équations linéaires sans procédure itérative.

minimum ou le maximum de la fonction objectif ( $F$ ). L'algorithme d'optimisation (algorithme mathématique) détermine un nouveau vecteur de variables indépendantes  $\mathbf{z}$ , utilisé dans le modèle pour calculer la nouvelle valeur de la fonction objectif  $F$ , compte tenu des contraintes d'égalité ( $\mathbf{h}$ ), d'inégalité ( $\mathbf{g}$ ) et des expressions logiques ( $\mathbf{L}$ ). La procédure est répétée jusqu'à ce que l'optimum soit atteint (au sens mathématique) ou qu'un critère de convergence soit satisfait (nombre maximal d'itérations, changements de la fonction objectif entre deux itérations compris dans un intervalle  $\varepsilon$ , etc.).

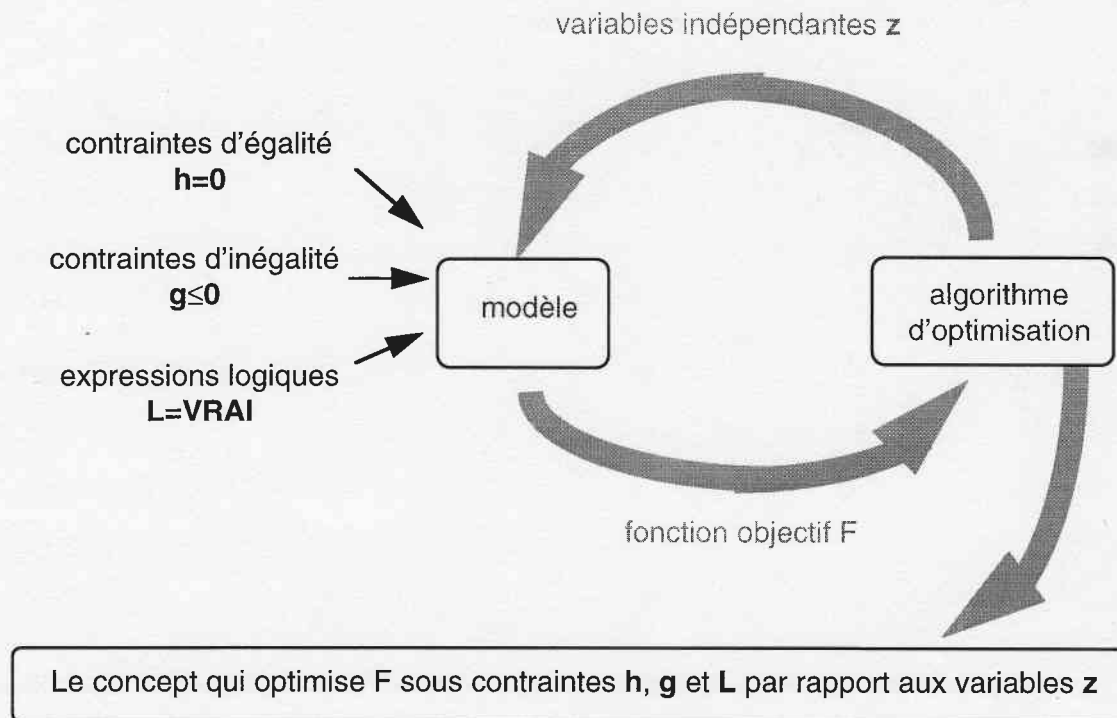


Figure 2.4 - Procédure d'optimisation.

### 2.1.5 Sûreté opérationnelle

La prise en considération des aspects liés à la **sûreté opérationnelle** des systèmes (**fiabilité et disponibilité**) ne peut pas être négligée, notamment lorsque la superconfiguration envisagée offre le choix de plusieurs options technologiques pour une même fonction (redondance) ou lorsque des limites de disponibilité de certains services doivent être garanties. Une méthode originale est présentée [Olsommer, 1998, 1999(b)] permettant de tenir compte de ces aspects dans le modèle thermoéconomique. Elle permet d'automatiser et d'évaluer avec plus de précision

que les approches traditionnelles, le calcul des performances, flux et coûts d'un système constitué d'une structure flexible d'équipements en redondance active et/ou passive, disposés en série et/ou en parallèle.

### 2.1.6 Approche quasi-stationnaire et décomposition sur deux niveaux d'optimisation

La formulation utilisée est basée sur une approche **quasi-stationnaire** et la résolution du problème s'effectue au moyen d'une procédure sur **deux niveaux** (cf. chapitre 3.5.2). Le premier optimise la structure (configuration et dimensionnement), et le second, les opérations, sur un nombre de séquences déterminé (série de sous-problèmes d'optimisation). La puissance de calcul requise par ce type de problème est considérable. Dans ce contexte, la procédure sur deux niveaux est **parallélisée** pour pouvoir être exécutée sur des machines massivement parallèles ou sur plusieurs machines séquentielles délocalisées et mises en parallèle au moyen du réseau internet, par exemple.

### 2.1.7 Algorithmes génétiques

L'algorithme mathématique utilisé appartient à la classe des "**algorithmes génétiques**", [Goldberg, 1994, Olsommer, 1997(b)] dont l'idée maîtresse est de reproduire à vitesse accélérée sur un ordinateur les phénomènes d'évolution des espèces, basés sur le principe que les individus bien adaptés à leur environnement multiplient leurs chances de survie. La version implémentée est une version de l'algorithme génétique "*Struggle*", développée au MIT<sup>8</sup> et modifiée au LENI pour les besoins de la thermoéconomie.

Parmi les avantages de ce dernier, citons sa robustesse, sa polyvalence (capacité à traiter efficacement n'importe quel type de problème mathématique, du plus simple au plus complexe (*MINLP*) ) et sa particularité à optimiser en "parallèle" (simultanément) plusieurs types de solutions, appelées niches. Ce dernier point est remarquable dans la mesure où l'ingénieur ou le décideur ne sont souvent pas intéressés par une solution unique mais par un ensemble de solutions (concepts, alternatives) différentes, dont ils peuvent, en dernier ressort, choisir la plus intéressante.

---

<sup>8</sup> Massachusetts Institute of Technology.

### **2.1.8 Application, remarques**

La méthode de modélisation et d'optimisation thermoéconomique simultanée de la configuration, du dimensionnement et des opérations a été appliquée aux centrales d'incinération d'ordures ménagères à cogénération avec appoint énergétique (*topping-cycle*).

Les résultats montrent, notamment, que les deux niveaux d'optimisation sont fortement liés et que, logiquement, il n'est pas possible de prendre des décisions rationnelles sur un niveau sans tenir compte de l'autre.

### 3. Optimisation thermoéconomique de la centrale de Posieux

Ce chapitre fournit une description plus détaillée de la méthode de modélisation et d'optimisation thermoéconomique ainsi que tous les paramètres propres à la centrale de Posieux. Le chapitre 3.1 présente la superconfiguration du système. Le modèle économique, le modèle thermodynamique, le modèle de sûreté des systèmes décrits dans [Olsommer, 1998] ont été adaptés aux spécificités de la future centrale de Posieux. Les modifications apportées à chacun des modèles sont décrites aux chapitres 3.2, 3.3 et 3.4. Le modèle thermoéconomique ainsi que la méthode d'optimisation associée sont décrites au chapitre 3.5. Les variables indépendantes ainsi que les contraintes d'inégalité sont décrites au chapitre 3.5. Le scénario énergétique et économique retenu est présenté au chapitre 3.6.

#### 3.1 Superconfiguration

La configuration retenue à l'heure actuelle pour la future centrale de Posieux se compose (figure 3.1) principalement<sup>9</sup>:

- d'un seul four d'incinération (F1);
- d'un boiler auxiliaire (BA) pour la production d'énergie pour le chauffage à distance (CAD);
- d'une ligne de turbine à vapeur à extraction comprenant principalement trois groupes d'étages de turbine (T2HP, T2MP, T2BP), un aérocondenseur (C2) et une pompe d'extraction (P2);
- d'un échangeur de chaleur pour le chauffage à distance (CAD) avec une pompe d'extraction (P3);

---

<sup>9</sup>Il est important de noter que cette configuration décrite ici comporte certaines simplifications par rapport à la réalité, dans la mesure où elle n'est constituée que des éléments principaux (i.e. qui ne peuvent pas être négligés dans le calcul des coûts et dans le modèle thermodynamique).



- d'une bache alimentaire (BAI);
- d'une pompe alimentaire (P4).

En outre, divers soutirages sont prévus pour le réglage de température de la bache alimentaire (ch\_BAI) et pour le préchauffage (ch\_vap\_C2) du condensat sortant de la pompe d'extraction (P2).

Pour juger de la judiciosité des choix de configuration et de dimensionnement de la future centrale de Posieux, et pour pouvoir proposer, le cas échéant, des alternatives intéressantes, une superconfiguration de la centrale est définie, regroupant toutes les options intéressantes répondant au cahier des charges. Les options supplémentaires par rapport à la configuration de base décrite ci-dessus comportent principalement:

- plusieurs lignes de fours supplémentaires (F2, F3);
- un appoint énergétique sous la forme d'une turbine à gaz (TG) dont les gaz sont soit récupérés par l'intermédiaire d'un récupérateur de chaleur (RC), soit injectés directement dans la chambre de combustion du (des) four(s) d'incinération.
- une ligne de turbine à vapeur à condensation (sans extraction) comprenant principalement deux groupes d'étages de turbine (T1HP, T2BP) séparés par un soutirage de vapeur pour le préchauffage (ch\_vap\_C1) du condensat sortant de la pompe d'extraction (P1), un aérocondenseur (C1) et une pompe d'extraction (P1).

Pour de plus amples détails quant aux motivations de ce choix de superconfiguration, le lecteur se référera à [Olsommer, 1998].

#### **Remarque:**

Par souci de simplification du modèle thermodynamique, les deux préchauffeurs des condensats ont été pris en compte comme de simples échangeurs à mélange au niveau de la bache alimentaire. Cette simplification importante procure un gain conséquent en temps de calcul pour une erreur négligeable au niveau du modèle thermodynamique. Dans le modèle économique, les coûts d'investissement ont été pris en compte implicitement en majorant le coût d'achat de la bache alimentaire.

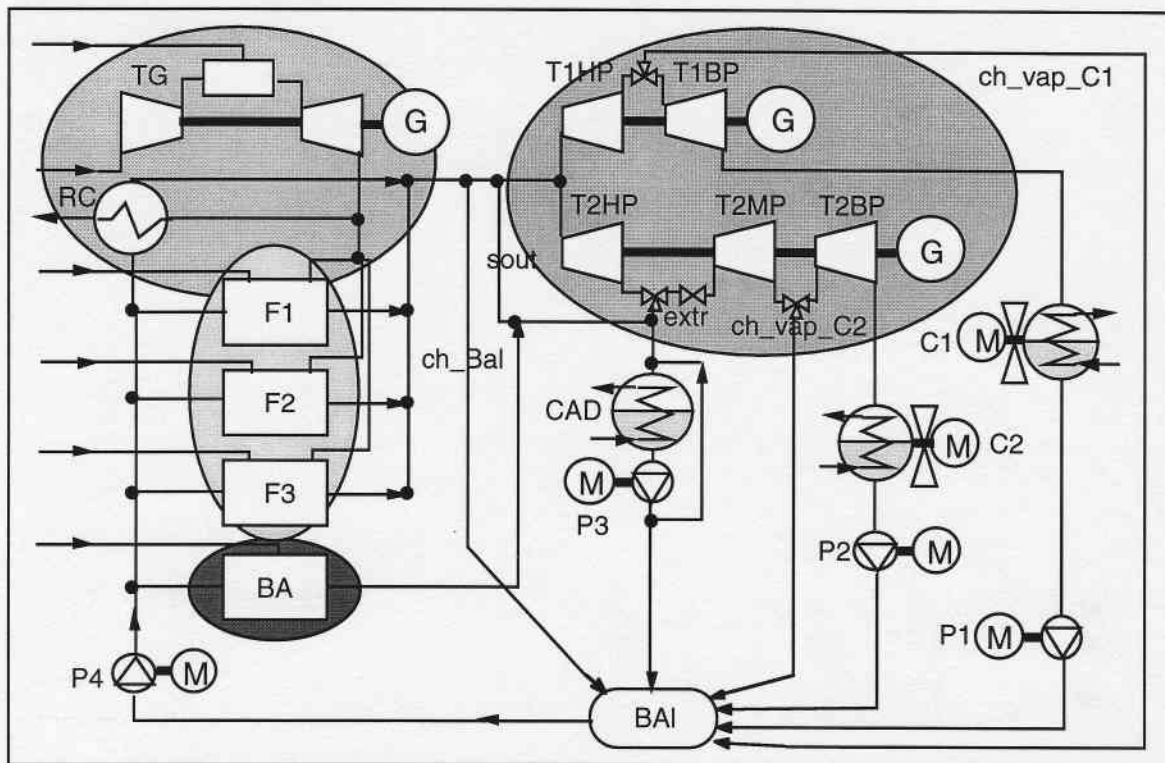


Figure 3.1 – Superconfiguration de la centrale de Posieux.

### 3.2 Modèle économique

Ce chapitre présente un résumé du modèle économique décrit dans [Olsommer, 1998]. Ce dernier a été adapté aux spécificités de la future centrale de Posieux. Les principales modifications apportées au modèle économique sont:

- divers paramètres économiques (taux, coefficients et autres facteurs sont résumés dans le tableau 3.1 (cf. chapitre 3.2.6));
- les coûts d'achat de divers équipements (fours d'incinération, système de dépollution, turbine à gaz, turbines à vapeur, bûche alimentaire);
- les coûts d'achat de la fosse à déchets et de la tuyauterie ont été rajoutés au modèle;
- le calcul des coûts initiaux a été adapté;
- le calcul des coûts de maintenance et des coûts des ressources a été affiné;

Dans le contexte de l'analyse économique d'un système sur sa durée de vie, deux paramètres interviennent de façon prépondérante: (i) la modélisation des différents coûts associés au système, et (ii) la modélisation des conditions cadres dans lesquelles s'inscrivent ces coûts. Les coûts totaux présents nets ( $C_{tpn}$ ) représentent la somme des coûts (dépenses moins recettes) intervenant tout au long de la vie du système, actualisés à une date prescrite (en général, au temps initial). Ces derniers définissent le critère sur la base duquel le système est optimisé (fonction objectif)<sup>10</sup>.

### 3.2.1 Principes de base

Les différentes composantes des  $C_{tpn}$  (cf. chapitre 3.2.2) s'inscrivent dans un environnement économique régi par les lois du marché. La principale caractéristique du système économique est que la valeur de l'argent n'est pas conservée avec le temps. De plus, les différents coûts fluctuent également avec le temps, notamment en fonction de l'offre et de la demande, mais aussi en relation avec la pénurie ou l'abondance des ressources, ou avec les progrès technologiques. Le modèle économique utilisé dans le cadre de ce travail permet de tenir compte dans une certaine mesure de ces différents paramètres. Les différents taux définis ci-dessous permettent de tenir compte de la dépendance temporelle de la valeur de l'argent.

Le taux nominal d'escalade ( $i_n$ ) caractérise la dévaluation de l'argent due aux phénomènes combinés d'inflation, de pénurie des ressources, de fluctuation de la demande et des progrès technologiques. Le taux du marché ( $i_m$ ) représente le taux moyen que l'on trouve sur le marché pour placer de l'argent et doit, en règle générale, au moins compenser la dévalorisation de l'argent. C'est ce taux qui est utilisé pour actualiser l'argent. Le taux d'intérêt de l'emprunt ( $i_h$ ) est le taux auquel le créancier prête de l'argent: en plus de la dévalorisation de l'argent, il intègre les différents risques attachés à la nature du projet et à la durée du prêt. Pour cette raison, le taux d'intérêt de l'emprunt ( $i_h$ ) est toujours supérieur aux deux précédents. Il est important de relever que ces taux sont définis la plupart du temps sur une période d'une année.

---

<sup>10</sup>Comparée à d'autres méthodes, la méthode des  $C_{tpn}$  est plus complète dans la mesure où elle optimise le système sur la base des coûts du système pour son environnement (société, par exemple), et non sur la base de la rapidité de rentabilisation des investissements comme la méthode du taux interne de rentabilité, par exemple.

Pour pouvoir additionner, soustraire ou comparer deux coûts, il faut les mettre sur des bases temporelles et monétaires identiques. La conversion de base monétaire est assurée par les taux de change ( $f_{\alpha \rightarrow \beta}$ ). Une somme d'argent à une période (N) est actualisée au taux du marché à la période actuelle au moyen du facteur de valeur présente FVP selon:

$$FVP(N, i_m) = \prod_k^N \frac{1}{1 + i_{m_k}} \quad (3.1)$$

Lorsque le taux du marché ( $i_m$ ) est constant, le FVP se simplifie et devient:

$$FVP(N, i_m) = \frac{1}{(1 + i_m)^N} \quad (3.2)$$

Le coût d'achat des équipements varie également avec le temps. Pour tenir compte de cela, les différentes fonctions de coûts des équipements, validées au moyen de bases de données de constructeurs doivent être réactualisées lorsqu'elles sont utilisées pour des périodes différentes. Ceci peut se faire au moyen d'index de prix, comme le "Marshall & Swift equipment cost index" [Chemical Engineering, 1998] qui est un indicateur de la fluctuation relative des prix des équipements. Basé sur cette base de donnée, le facteur ( $f_{M\&S}$ ) permet d'estimer le prix de l'équipement à une date  $d_2$ , connaissant sa valeur à une date  $d_1$ .

$$C_{d_2} = C_{d_1} f_{M\&S_{d_1 \rightarrow d_2}} \quad (3.3)$$

où  $f_{M\&S_{d_1 \rightarrow d_2}}$  résulte du quotient des index de M&S en  $d_2$  et en  $d_1$ .

Les emprunts sont supposés être remboursés sur une période (N) selon le système des annuités constantes à taux fixe. Dans ce cas, les annuités sont données par le facteur de retour sur les investissements (FRI) donné par:

$$FRI(N, i_h) = \frac{i_h}{1 - (1 + i_h)^{-N}} \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Composition des coûts totaux présents nets ( $C_{tpn}$ )

Lorsque l'analyse d'un système porte sur sa durée de vie économique ( $N_e$ ), définie par la durée entre la construction du système et son enlèvement, les  $C_{tpn}$  se composent principalement de deux types de coûts: ceux liés à l'achat et à la construction du système, et ceux liés à l'exploitation, à la gestion financière du système et aux différents flux de matière et d'énergie entre le système et l'extérieur<sup>11</sup>. Le premier type de coûts est constitué de l'ensemble des coûts associés au capital d'investissement et donc aux niveaux de configuration-dimensionnement, alors que le second type regroupe tous les coûts liés au fonctionnement du système (niveau des opérations) et sont fréquemment appelés coûts opérationnels dans la littérature [Frangopoulos, 1990(a,b)]. Une description complète des coûts des systèmes énergétiques peut être trouvée dans [Bejan, 1996] ou encore dans [Peters et Timmerhaus, 1990]. Pour les centrales d'incinération cependant, la répartition des coûts est sensiblement différente de celle des systèmes de production d'énergie classiques (centrales combinées ou à cogénération). Pour les centrales d'incinération, les coûts du génie-civil, notamment, représentent approximativement 55 (%) [GEDEL, 1993] des coûts d'achat des équipements, contre environ 70 (%) pour les centrales thermiques [Bejan, 1996].

Ce qui suit constitue une représentation simplifiée de la composition des  $C_{tpn}$  et est valable pour les centrales d'incinération d'ordures ménagères.

#### Coûts associés au capital total d'investissement ( $C_{CTI}$ ):

Le capital total d'investissement ( $CTI_t$ ) représente les dépenses ponctuelles effectuées pour s'approprier des biens (terrains, bâtiments, machines, honoraires). Le CTI est la somme de plusieurs coûts, dont le coût d'achat des équipements ne représente qu'une partie. Pour les centrales d'incinération, le CTI est constitué principalement des coûts d'achat des équipements ( $C_{AE}$ ), des coûts de bâtiment, terrains et préparation ( $C_{BTP}$ ), et des coûts des honoraires ( $C_H$ ) [Gedel, 1993].

$$CTI_t = C_{AE_t} + C_{BTP_{t=0}} + C_{H_{t=0}} \quad (3.5)$$

---

<sup>11</sup> Notons que les coûts de démantèlement et/ou de sauvetage sont pris en compte dans les coûts liés à la gestion financière.

Les  $C_{AE_t}$  sont calculés au moyen de modèles mathématiques continus, exprimés pour chaque type d'équipement en fonction des variables du système ( $z, y$ ) et de coefficients ajustés à une base de données représentatives du marché (cf. chapitre 3.2.3). Ces coûts dépendent du temps, car les achats peuvent être échelonnés sur toute la durée de vie économique de la centrale et sont nuls à un instant ( $t$ ) s'il n'y a pas d'achat d'équipement à cette période.

Les  $C_{BTP}$  sont des coûts initiaux ( $t=0$ ) fonction de la taille de la centrale. En première approximation, on peut admettre qu'ils dépendent principalement du flux de déchets de dimensionnement traité par la centrale (cf. chapitre 3.2.4).

Dans la mesure où les procédures administratives sont identiques, quelles que soient les tailles des installations d'incinération, les  $C_H$ , qui sont des coûts initiaux ( $t=0$ ), peuvent être admis constants<sup>12</sup>.

Chaque entreprise a sa propre caractéristique en matière de sources de financement. Les entreprises semi-privées comme les centrales d'incinération, bénéficient (en Suisse) de subventions de l'Etat et des Cantons non-remboursables sur le  $C_{CTI}$ .<sup>13</sup> Les installations thermiques de pompes à chaleur ou de technologies utilisant des énergies renouvelables, peuvent toucher certaines subventions dans le cadre de programmes d'encouragement à l'utilisation rationnelle de l'énergie. Appelons ( $s$ ) le pourcentage du  $C_{CTI}$  qui est subventionné et ( $h$ ) la part empruntée. Alors  $(1-s-h)$  représente la part des fonds propres.

Le taux des coûts associés au CTI à l'instant ( $t$ ) ( $\dot{C}_{CTI_t}$ ) peut être exprimé en fonction des fonds propres, des coûts engendrés par les annuités à payer tout au long de la durée de remboursement ( $N_h$ ) et du  $\dot{C}_{CTI_{t-1}}$  de l'instant précédent ( $t-1$ ):

$$\dot{C}_{CTI_t} = [ (1-s-h) CTI FRI(N_h, i_m) + h CTI FRI(N_h, i_h) ]_t + \dot{C}_{CTI_{t-1}} \quad (\text{CHF/an}) \quad (3.6)$$

---

<sup>12</sup> Dans la réalité, il est évident que ces coûts devraient être ajustés de cas en cas, selon le pays où même la région d'implantation de l'usine. Pourtant, ce type de considérations sort largement du cadre de ce travail.

<sup>13</sup> Ces subventions ont été abrogées en Suisse dès le 31.12.97, à l'exception de certains projets (TRIDEL-Lausanne, Posieux-Fribourg).

Notons que les fonds propres représentent en principe une somme à verser à un instant précis et unique. Dans l'équation (3.6), ils sont présentés sous la forme d'annuités constantes mais au taux du marché  $i_m$ , lesquelles, puisqu'elles sont actualisées et sommées à la période initiale au même taux du marché ( $i_m$ ) (équation 3.4) redonnent la valeur exacte des fonds propres.

Les valeurs des facteurs  $s$  et  $h$  sont données dans le tableau 3.1 (cf. chapitre 3.2.6).

### Coûts associés à la dépréciation ( $\dot{C}_{dep}$ ):

Dans la majorité des entreprises, des fonds de renouvellement et/ou d'investissement sont constitués pour pouvoir financer la totalité ou une partie de futurs investissements. Pour les centrales d'incinération, ces fonds sont constitués principalement pour renouveler des équipements rendus obsolètes après des années de service. Le montant de la somme à mettre annuellement de côté au taux du marché ( $i_m$ ) correspond à la perte de valeur de l'équipement (dépréciation) de sorte qu'à la fin de la vie de ce dernier, un montant équivalent aura été reconstitué. Selon la méthode du fonds de renouvellement [Peters et Timmerhaus, 1990], l'annuité ( $\dot{C}_{dep}$ ) vaut:

$$\dot{C}_{dep_t} = \left[ \gamma (C_{AE} - C_{AE_s}) \frac{i_m}{(1+i_m)^{N_e} - 1} \right] + \dot{C}_{dep_{t-1}} \quad (\text{CHF/an}) \quad (3.7)$$

où  $C_{AE_s}$  est la valeur de sauvetage de l'équipement à la fin de sa vie économique<sup>14</sup> ( $N_e$ ).  $\gamma \in [0, \dots, 1]$  représente la part du fonds que l'on désire constituer et vaut 1 si l'entreprise désire subvenir elle-même (pas d'emprunt) à ses financements futurs.

La valeur du facteur  $\gamma$  est donnée dans le tableau 3.1 (cf. chapitre 3.2.6).

### Coûts des ressources ( $\dot{C}_{res}$ ):

Ils représentent les coûts associés aux flux de matière et/ou d'énergie entrant ou sortant représentant une dépense pour le système. Ils s'expriment comme une fonction linéaire du flux ( $\dot{\Phi}$ ):

$$\dot{C}_{res} = c \dot{\Phi} \quad (\text{CHF/s}) \quad (3.8)$$

<sup>14</sup> Dans le cas où la valeur de sauvetage est négative,  $C_{AE_s}$  représente les coûts de démantèlement.

avec  $c$  le coût unitaire du flux ( $\dot{\Phi}$ ), exprimé en (CHF/kg) ou en (CHF/kJ) et sujet à des fluctuations au cours du temps.

### Revenus ( $\dot{C}_{rev}$ ):

Ils représentent les gains associés aux flux de matière et/ou d'énergie entrant ou sortant représentant une recette pour le système. Ils s'expriment comme une fonction linéaire du flux ( $\dot{\Phi}$ ):

$$\dot{C}_{rev} = c \dot{\Phi} \quad (\text{CHF/s}) \quad (3.9)$$

avec  $c$  le coût unitaire du flux ( $\dot{\Phi}$ ), exprimé en (CHF/kg) ou en (CHF/kJ) et sujet à des fluctuations au cours du temps.

### Coûts associés à la maintenance et à l'exploitation ( $\dot{C}_{maint}$ ):

Les coûts associés à la maintenance et à l'exploitation du système (personnel, entretien, divers) peuvent être divisés en deux parties :

- la première peut s'exprimer, en première approximation, comme une fonction linéaire du capital représenté par le coût d'achat des équipements ( $C_{AE}$ ) pour la partie électro-motrice et par les coûts des parties immobilières, des procédures et honoraires ( $C_{BTP}$ ):

$$\dot{C}_{maint_1 t} = \left[ f_{maint_{AE}} (C_{AE} - C_{AE_{TG}}) + f_{maint_{BTP}} C_{BTP} \right]_t \dots + \dot{C}_{maint_1 t-1} \quad (\text{CHF/an}) \quad (3.10)$$

avec  $f_{maint_{AE}}$ <sup>15</sup> et  $f_{maint_{BTP}}$  des facteurs de maintenance.

- la seconde comporte des coûts ne s'exprimant pas de façon récurrente comme l'équation (3.10). Ils se composent des coûts de maintenance de la turbine à gaz ( $\dot{C}_{maint_{TG}}$ ) et des salaires du personnel ( $\dot{C}_{Sal}$ ) de la centrale:

---

<sup>15</sup> Comme les coûts de maintenance associés à la turbine à gaz sont déjà pris en compte dans l'équation (3.11), il faut retrancher les coûts d'achat de la turbine à gaz du coût d'achat des équipements.



$$\dot{C}_{\text{maint}_2}_t = [\dot{C}_{\text{maint}_{\text{TG}}} + \dot{C}_{\text{Sal}}]_t \quad (\text{CHF/an}) \quad (3.11)$$

Les coûts de maintenance de la turbine à gaz peuvent s'exprimer comme une fonction de la puissance électrique de dimensionnement ( $\dot{E}_{\text{el}}$ ) corrélée aux données fournies dans [Strömberg et al., 1993]:

$$\dot{C}_{\text{maint}_{\text{TG}}} = c_1 \dot{E}_{\text{el}}^{c_2} \quad (3.12)$$

Les valeurs des divers facteurs et coefficients sont données dans le tableau 3.1 (cf. chapitre 3.2.6).

#### Coûts des assurances ( $\dot{C}_{\text{ass}}$ ):

Les coûts des assurances peuvent être admis comme une fonction linéaire du capital représenté par le coût d'achat des équipements présents ( $C_{\text{AE}}$ ):

$$\dot{C}_{\text{ass}_t} = [f_{\text{ass}} C_{\text{AE}}]_t + \dot{C}_{\text{ass}_{t-1}} \quad (\text{CHF/an}) \quad (3.13)$$

avec  $f_{\text{ass}}$  le facteur d'assurance. La valeur du facteur  $f_{\text{ass}}$  est donnée dans le tableau 3.1 (cf. chapitre 3.2.6).

#### Coûts des impôts ( $\dot{C}_{\text{tax}}$ ):

En principe, les impôts sont levés à la fois sur le bénéfice brut de l'entreprise et sur son capital. Dans la mesure où ils ne représentent qu'une petite fraction des  $C_{\text{tpn}}$ , les coûts engendrés par les impôts peuvent, en première approximation, également se mettre sous la forme de fonction linéaire du capital représenté par le coût d'achat des équipements présents ( $C_{\text{AE}}$ ):

$$\dot{C}_{\text{tax}_t} = [f_{\text{tax}} C_{\text{AE}}]_t + \dot{C}_{\text{tax}_{t-1}} \quad (\text{CHF/an}) \quad (3.14)$$

avec  $f_{\text{tax}}$  le facteur d'imposition. La valeur du facteur  $f_{\text{tax}}$  est donnée dans le tableau 3.1 (cf. chapitre 3.2.6).

#### Coûts fixes ( $\dot{C}_{\text{fix}}$ ):

Les autres coûts (traitement des boues et des scories, administration, divers) peuvent être rangés dans les coûts fixes qui sont indépendants des modes

opératoires. En première approximation, ils peuvent être admis comme une fonction linéaire du capital représenté par le coût d'achat des équipements présents ( $C_{AE}$ ):

$$\dot{C}_{fix_t} = [f_{fix} C_{AE}]_t + \dot{C}_{fix_{t-1}} \quad (\text{CHF/an}) \quad (3.15)$$

avec  $f_{fix}$  le facteur des coûts fixes. La valeur du facteur  $f_{fix}$  est donnée dans le tableau 3.1 (cf. chapitre 3.2.6).

Les coûts totaux présents nets ( $C_{tpn}$ ) sont constitués des différents coûts énumérés ci-dessus. Ces développements amènent les commentaires suivants:

- (i) Le modèle de répartition des coûts représenté par les équations (3.5-3.15) est valable pour les centrales d'incinération essentiellement.
- (ii) Exprimés ainsi, seuls les coûts des ressources (équation 3.8) et les revenus (équation 3.8) dépendent du niveau des opérations. Les autres contributions ne dépendent que des niveaux de configuration-dimensionnement, c'est-à-dire qu'ils n'interviennent pas sur le niveau des opérations.
- (iii) Les différents coûts ci-dessus sont tous exprimés en taux, mais leur base de temps peut être différente selon les cas: (CHF/an) et (CHF/s). Pour être cohérent, il faut ramener ces coûts à une base de temps identique pour chaque tranche de temps (cf. chapitre 3.5.1).

### 3.2.3 Coûts d'achat des équipements

Ce chapitre ne présente que les fonctions de coûts qui ont dû être adaptées ou modifiées par rapport à la référence [Olsommer, 1998].

Les coûts d'achat des équipements sont décrits par des relations mathématiques continues <sup>16</sup> exprimées en fonction des paramètres physiques de ces derniers. Des coefficients calculés au moyen de procédés de régression permettent d'ajuster les fonctions aux données du marché.

---

<sup>16</sup> Par opposition à une approche discrète utilisant une base de données au moyen de catalogues.

### 3.2.3.1 Fours d'incinération

Les coûts des fours d'incinération se composent des coûts des incinérateurs ( $_{\text{incin}}$ ) et des chaudières ( $_{\text{ch}}$ ). Les fonctions ont été corrélées sur la base de données du marché [GEDEL, 1997, SAIDF, 1998]. Les coûts sont fonction des débits (exprimés en (t/h)) de déchets ( $\dot{m}_d$ ) pour l'incinérateur (équation 3.17) et de vapeur ( $\dot{m}_{\text{vap}}$ ) pour les chaudières (équation 3.18). Les coûts sont donnés par nombre de lignes (nombre de fours) acquises simultanément.

Les valeurs des coefficients et autres paramètres sont fournis dans l'Annexe A.I.

$$C_{\text{AEF}} = \left( C_{\text{AEF}_{\text{incin}}} + C_{\text{AEF}_{\text{ch}}} \right) * f_{\text{M\&S}} \quad (\text{Mios CHF}) \quad (3.16)$$

$$C_{\text{AEF}_{\text{incin}}} = c_1 \dot{m}_d^{c_2} \quad (\text{Mios CHF}) \quad (3.17)$$

$$C_{\text{AEF}_{\text{ch}}} = c_1 \dot{m}_{\text{vap}}^{c_2} + c_3 \quad (\text{Mios CHF}) \quad (3.18)$$

### 3.2.3.2 Système de dépollution

Le système de dépollution comprend non seulement le lavage des gaz, mais encore le système de traitement des rejets liquides. Evaluer précisément les coûts de ces systèmes sort du cadre de ce travail. La corrélation fournie ci-dessous (équation 3.19) relie empiriquement les coûts au débit de gaz ( $\dot{m}_R$ ) à traiter sans prendre en compte la technologie utilisée. Les coefficients sont fournis dans l'Annexe A.I. La validité de la corrélation basée sur des données de plusieurs sites de traitement de déchets en Suisse, est comprise dans une fourchette de 3 (%).

$$C_{\text{AEDepol}} = c_1 \dot{m}_R^{c_2} * f_{\text{M\&S}} \quad (\text{Mios CHF}) \quad (3.19)$$

### 3.2.3.3 Turbine à gaz

Le coûts de la turbine à gaz se composent des coûts du compresseur ( $_{\text{K}}$ ), de la chambre de combustion ( $_{\text{CC}}$ ) et de la turbine ( $_{\text{T}}$ ). La fonction, tirée de [Frangopoulos, 1991], a été réactualisée au moyen d'une banque de données établies sur la base d'indications de divers constructeurs. Les coefficients sont fournis dans l'Annexe A.I.

Les coûts du compresseur s'expriment en fonction du débit d'air entrant dans le système ( $\dot{m}_L$ ) en (kg/s) (cf. figure 3.2), du rendement isentrope ( $\eta_{sK}$ ) et du rapport de pression ( $\Pi$ ). Les coûts de la chambre de combustion dépendent du débit d'air ( $\dot{m}_L$ ) en (kg/s) et de la température de combustion ( $T_C$ ) en (K). Les coûts de la turbine sont fonction du débit de gaz sortant du système ( $\dot{m}_{R_{tot}}$ ) en (kg/s), du rendement isentrope de la turbine ( $\eta_{sT}$ ), du rapport de pression et de la température des gaz à l'entrée dans le premier étage ( $T_{R_{comb}}$ ) en (K). Un facteur ( $c_{17}$ ) permet de tenir compte des coûts d'installation et d'appareils de commande. Comme le site de Posieux ne se trouve pas à proximité directe d'un réseau de gaz naturel, les coûts de branchement sont rajoutés aux coûts de la turbine à gaz (équation 3.24) [GEIMESA, 1998]. En l'absence de base de donnée supplémentaire, ces coûts sont supposés constants dans cette étude.

La majorité des points du modèle comparés aux données des constructeurs sont compris dans une fourchette de 5 (%) [Olsommer, 1998].

$$C_{AE_{TG}} = \left[ \left( C_{AE_{TGK}} + C_{AE_{TGCC}} + C_{AE_{TGT}} \right) * (1 + c_{17}) \dots \right. \\ \left. + C_{AE_{BR}} \right] * f_{M\&S} \quad (\text{CHF}) \quad (3.20)$$

$$C_{AE_{TGK}} = c_1 \dot{m}_L^{c_2} * \left( \frac{1}{c_3 - \eta_{sK}} \right)^{c_4} * \Pi^{c_5} * \ln(\Pi) \quad (\text{CHF}) \quad (3.21)$$

$$C_{AE_{TGCC}} = c_6 \dot{m}_L^{c_7} * \left( 1 + e^{(c_8 T_C - c_9)} \right) \quad (\text{CHF}) \quad (3.22)$$

$$C_{AE_{TGT}} = c_{10} \dot{m}_{R_{tot}}^{c_{11}} * \left( \frac{1}{c_{12} - \eta_{sT}} \right)^{c_{13}} * \\ \Pi^{c_{14}} * \ln(\Pi) * \left( 1 + e^{(c_{15} T_{R_{comb}} - c_{16})} \right) \quad (\text{CHF}) \quad (3.23)$$

$$C_{AE_{BR}} = c_{18} \quad (3.24)$$

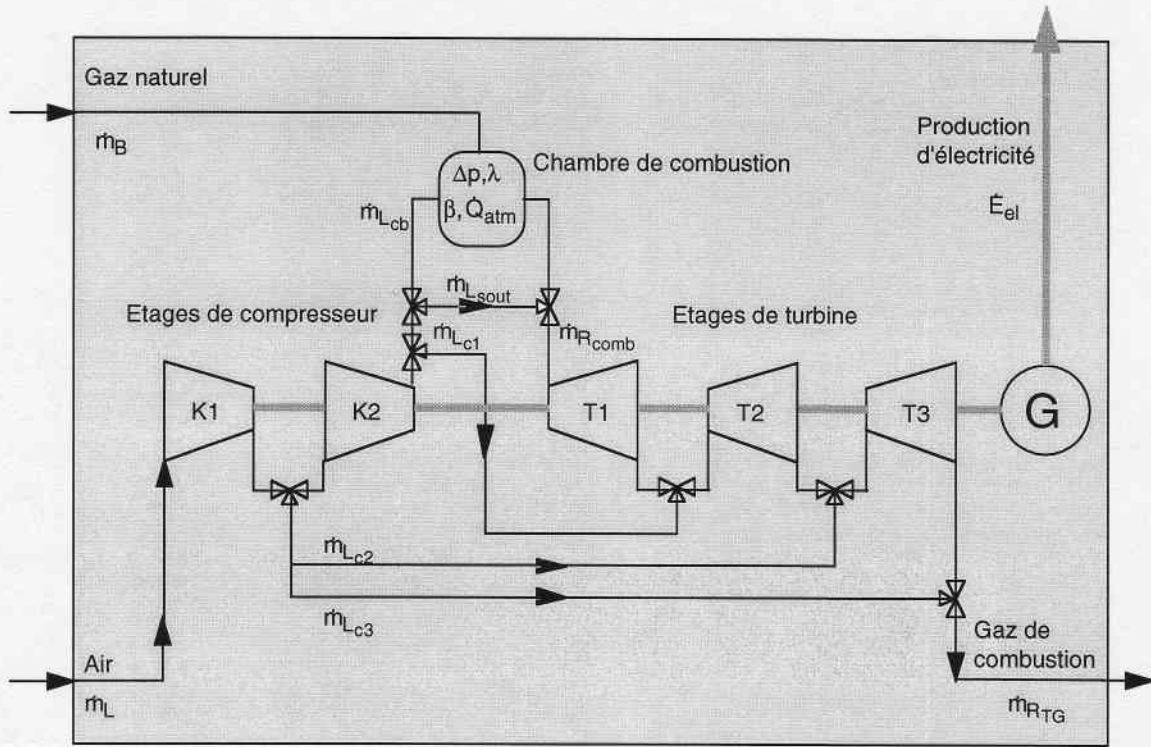


Figure 3.2 - Schéma de principe du modèle de turbine à gaz utilisé dans ce travail.

### 3.2.3.4 Turbines à vapeur

Les coûts des turbines à vapeur à condensation (équation 3.25) et à extraction (équation 3.26) sont tirées de [Pelster, 1998]. Elles sont fonction de la puissance électrique produite ( $\dot{E}_{el}$ ) en (W), de la température d'entrée de la vapeur ( $T_{in}$ ) en (K). Les fonctions ont été ajustées aux données du marché. Le coefficient  $c_1$  exprime un coût unitaire (\$/W),  $c_2$  une puissance de référence (W),  $c_4$  un facteur tenant compte du nombre de surchauffe (-),  $c_5$  une température de vapeur vive de référence (K),  $c_6$  une valeur de référence pour l'écart de température (K),  $c_7$  un facteur tenant compte de la vitesse de rotation de l'arbre et de la présence d'un organe de réglage de pression et débit pour une extraction de vapeur (-).

Les détails des coefficients sont fournis dans l'Annexe A.I.

$$C_{AE_{T1}} = c_1 \dot{E}_{el} * \left( \frac{c_2}{\dot{E}_{el}} \right)^{c_3} * \left( 1 + c_4 e^{\left( \frac{T_{in} - c_5}{c_6} \right)} \right) * c_7 * f_{\$ \rightarrow CHF} * f_{M\&S} \quad (\text{CHF}) \quad (3.25)$$

$$C_{AE_{T2}} = c_1 \dot{E}_{el} * \left( \frac{c_2}{\dot{E}_{el}} \right)^{c_3} * \left( 1 + c_4 e^{\left( \frac{T_{in} - c_5}{c_6} \right)} \right) * c_7 * f_{\$ \rightarrow CHF} * f_{M\&S} \quad (\text{CHF}) \quad (3.26)$$

### 3.2.3.5 Bâche alimentaire

Le coût d'achat de la bâche alimentaire est fonction du débit d'eau ( $\dot{m}$ ) sortant de la bâche en (kg/s) [Boehm, 1987]. Les valeurs des coefficients sont fournies dans l'Annexe A.I

$$C_{AE_{BAI}} = c_1 \dot{m}^{c_2} * f_{\$ \rightarrow CHF} * f_{M\&S} \quad (\text{CHF}) \quad (3.27)$$

### 3.2.3.6 Fosse à déchets

Le coût d'achat de la fosse à déchets est fonction du volume construit ( $V_{fosse}$ ) exprimé en ( $m^3$ ). Ce dernier se calcule (équation 3.28) en fonction du débit de déchets ( $\dot{m}_d$ ) en (kg/s) de la durée de stockage ( $\Delta t_{stock}$ ) de la masse volumique des déchets ( $\rho_d = 400 \text{ (kg/ } m^3)$ ) et du gerbage<sup>17</sup> ( $f_g = 0.5$  (-)). La fonction a été corrélée sur la base de la future centrale de Posieux [SAIDEF, 1998].

Les valeurs des coefficients de l'équation (3.29) sont fournis dans l'Annexe A.I.

$$V_{fosse} = \frac{\dot{m}_d \Delta t}{\rho_d f_g} \quad (3.28)$$

$$C_{AE_{fosse}} = \left( c_1 \left( \frac{V_{fosse}}{c_2} \right)^{c_3} + c_4 \right) * f_{M\&S} \quad (\text{CHF}) \quad (3.29)$$

<sup>17</sup> Le gerbage correspond au volume utile de la fosse.

### 3.2.3.7 Tuyauterie

Le coût d'achat de la tuyauterie<sup>18</sup> est supposé proportionnel à la masse de tuyaux. Sous l'hypothèse que la vitesse d'écoulement est dimensionnée à une même valeur, il est possible de montrer que la masse de tuyaux est proportionnelle à la racine carrée ( $c_2=0.5$ ) du débit volume de vapeur (équation 3.30).

Les valeurs des coefficients de l'équation (3.30) sont fournis dans l'Annexe A.I.

$$C_{AE_{tuy}} = c_1 \left( \frac{\dot{m}_{vap}}{\rho_{vap}} \right)^{c_2} * f_{M\&S} \quad (3.30)$$

### 3.2.4 Coûts initiaux

Les coûts initiaux de la superconfiguration envisagée (cf. figure 3.1) se composent, outre les coûts des équipements ( $C_{AE}$ ), des coûts liés à la construction des bâtiments, à l'achat et l'aménagement des terrains ( $C_{BTP}$ ), ainsi que des divers coûts d'honoraires, de procédures ( $C_H$ ) (cf. chapitre 3.2.2).

Même s'il est difficile de calculer explicitement ces coûts ( $C_{BTP}$ ,  $C_H$ ), il est important d'en tenir compte premièrement pour le réalisme du modèle économique, et deuxièmement pour ne pas fausser le choix de la configuration et du dimensionnement optimaux.

En première approximation<sup>19</sup>, les  $C_{BTP}$  peuvent s'écrire comme une fonction de la capacité de l'usine, c'est-à-dire fonction du tonnage annuel incinéré ( $m_{dan}$ ) en (t/an).

Comme la corrélation tient déjà compte du coût de la fosse à déchets, il faut y retrancher ce dernier ( $C_{AE_{fosse}}$ ).

---

<sup>18</sup> Ces coûts ne sont calculés explicitement que pour chaque ligne de turbines à vapeur (T1, T2). Pour les autres équipements (fours, turbine à gaz), ils sont pris en compte implicitement dans le calcul des coûts de ces équipements.

<sup>19</sup> Les relations ont été évaluées sur la base de centrales planifiée ou existante [GEDEL, 1993; SAIOD, 1997].

$$C_{BTP_{t=0}} = 84.263 \left( \frac{m_{dan}}{207000} \right)^{0.64} - C_{AE_{fosse}} \quad (\text{Mios CHF}) \quad (3.31)$$

En première approximation, les  $C_H$  peuvent être considérés comme des coûts fixes et sont donnés par une constante (cf. chapitre 3.2.2) [SAIDEF, 1998]<sup>20</sup>.

$$C_{H_{t=0}} = 15 \quad (\text{Mios CHF}) \quad (3.32)$$

### 3.2.5 Coûts opérationnels

Au niveau opérationnel, la fonction objectif s'exprime par la différence des coûts des ressources et des revenus (équation 3.34). Les coûts des ressources se composent:

- (i) des coûts associés à la consommation de combustible aux niveaux de la turbine à gaz (TG) et du boiler auxiliaire (BA);
- (ii) des coûts associés à la consommation de divers produits pour le traitement des déchets (eau, air comprimé, combustible divers, chaux vive (CaO), ammoniacque (NH<sub>3</sub>), charbon actif, soude caustique (NaOH), acide chloridrique (HCl), acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), divers (lubrifiants, etc.));
- (iii) des coûts associés à l'évacuation et au traitement des mâchefers, des cendres volantes et du gâteau (comptabilisés dans les coûts des ressources);
- (iv) des coûts associés à l'exportation des déchets vers d'autres installations à cause de la saturation du stock (comptabilisés dans les coûts des ressources<sup>21 22</sup>).

---

<sup>20</sup> Ils ne contribuent donc pas à la recherche de l'optimum.

<sup>21</sup> Ils sont comptabilisés dans les coûts des ressources afin de ne pas alourdir inutilement la forme de la fonction objectif.

<sup>22</sup> Il est supposé que les coûts d'importation (transport jusque sur le site) et de préparation (tri) des déchets sont facturés à la source (producteur de déchets) et n'interviennent pas au niveau de la centrale d'incinération: c'est du reste le cas sur la plupart des sites.



Les revenus, sont constitués exclusivement de la vente d'électricité au réseau et de chaleur au réseau de chauffage à distance. Notons que la quantité d'énergie vendue au réseau résulte de la différence entre la production d'électricité (TG, T1, T2) et les diverses consommations internes (P1, P2, P3, P4, C1, C2) (équation 3.33).

$$\dot{E}_{el\ t} = \left[ \left( \dot{E}_{elT1} + \dot{E}_{elT2} + \dot{E}_{elTG} \right) - \left( \dot{E}_{elC1} + \dot{E}_{elC2} + \dot{E}_{elP1} + \dot{E}_{elP2} + \dot{E}_{elP3} + \dot{E}_{elP4} \right) \right]_t \quad (3.33)$$

La somme des coûts et des revenus exprimée en (CHF/s) constitue la fonction objectif du niveau opérationnel (cf. chapitre 3.5.2) et est donnée par:

$$\dot{C}_t = \left[ \left( c_{gaz} \dot{m}_{BTG} + c_m \dot{m}_{BBA} + c_{p+m+c+g} \dot{m}_d + c_{export} \dot{m}_{d_{export}} \right) - \left( c_{el} \dot{E}_{el} + c_{CAD} \dot{Q}_{CAD} \right) \right]_t \quad (3.34)$$

Les coûts sous (ii) et (iii) sont regroupés dans ( $c_{p+m+c+g}$ ) et s'expriment par unité de déchets traités (CHF/kg). Les divers paramètres sont fournis dans le tableau 3.1 (cf. chapitre 3.2.6)

### 3.2.6 Paramètres du modèle

Les paramètres du modèle économique peuvent être de nature variable ou fixe<sup>23</sup>. Le tableau 3.1 en présente une liste exhaustive et précise leur valeur choisie dans ce travail s'ils sont considérés comme étant indépendants du temps<sup>24</sup>.

Le taux d'emprunt ( $i_h$ ) est différencié pour les parties électro-motrices (EM, i.e.  $C_{AE}$ ) et les parties immobilières et frais de procédures et autres honoraires (GC, i.e.  $C_{BTP}$  et  $C_H$ ). Leur valeur est choisie sur la base d'installations actuelles de ce type [GEDEL, 1993]. Pour une optimisation sur toute la durée de vie économique ( $N_e$ ) de la centrale dans laquelle le paramètre temporel intervient, la configuration n'est pas

<sup>23</sup> Ou supposés comme tels.

<sup>24</sup> Dans ce travail, l'année de référence pour les scénarios de fluctuation des paramètres est 2000, date de construction mise en service de l'installation.

figée dans le temps. Dans ce contexte, les équipements peuvent être acquis à des périodes différentes. Afin de pouvoir réellement déterminer ce que coûtent les choix des configurations dépendant du temps pour la société, il est important de fixer la durée de remboursement ( $N_h$ ) à une durée fixe dans le temps<sup>25</sup>, c'est-à-dire variable pour les équipements (fonction de leur date d'acquisition). L'hypothèse est faite que les durées de remboursement pour les parties EM et GC sont identiques.

Le taux de subventionnement ( $s$ ) attribué à la centrale de Posieux est nul pour les investissements touchant à la production d'énergie (EN) et est de 25 (%) pour les investissements touchant au traitement des déchets (D). Le taux d'emprunt ( $h$ ), la part des fonds associés aux coûts de dépréciation ( $\gamma$ ), ainsi que les facteurs de coûts associés à la maintenance ( $f_{\text{maint}}$ ) sont basés sur les données de la centrale de Posieux [SAIDF, 1998]. Les facteurs associés aux assurances ( $f_{\text{ass}}$ ), aux impôts ( $f_{\text{tax}}$ ) et aux coûts fixes ( $f_{\text{fix}}$ ) ont été évalués sur la base de centrales existantes [Olsommer, 1998]. Les taux du marché ( $i_m$ ) et d'inflation ( $i_n$ ) sont supposés constants et sont choisis sur la base de données actuelles typiques [BCV, 1997]. Pour les années précédant 1998, l'index de Marshall&Swift ( $f_{\text{M\&S}}$ ) est tiré de [Chemical Engineering, 1998].

Tableau 3.1 - Paramètres économiques.

Description	Symbole	Nature v=variable f=fixe	Valeur
Taux emprunt	$i_h$	f	EM : 0.05 (-) GC : 0.05 (-)
Taux marché	$i_m$	f	0.03 (-)
Taux inflation	$i_n$	f	0.015 (-)
Durée remboursement	$N_h$	f	25 (ans)
Subventions	$s$	f	EN : 0.0 (-) D : 0.25 (-)
Emprunts	$h$	f	EN : 0.8 (-) D : 0.55 (-)

<sup>25</sup> Le cas échéant les coûts associés à des équipements acquis vers la fin de la durée de vie de la centrale ne seraient pas remboursés.

Tableau 3.1 (suite) - Paramètres économiques.

Durée vie économique	$N_e$	f	25 (ans)
Marshall&Swift	$f_{M\&S}$	v	Tableau 3.11, ch. 3.6
Change	$f_{\$ \rightarrow CHF}$	f	1.52
Dépréciation	$\gamma$	f	EM : 0.325 (-) GC : 0.0 (-)
Valeur de sauvetage	$C_{AE_s}$	f	0 (CHF)
Ressources, revenus <sup>26</sup>	c	v	Tableau 3.11, ch. 3.6
Exportation des déchets	$c_{export}$	f	0.3 (CHF/kg)
Produits, scories, cendres, gâteau	$c_{p+m+c+g}$	f	0.0367 (CHF/kg)
Maintenance	$f_{maintAE}$	f	0.03 (-)
	$f_{maintBTP}$	f	0.008 (-)
Maintenance TG	$c_1$	f	37.481 (CHF/W <sup>c2</sup> )
	$c_2$	f	0.5886 (-)
Salaires	$\dot{C}_{sal}$	f	3230000 (CHF/an)
Assurances	$f_{ass}$	f	0.007 (-)
Impôts	$f_{tax}$	f	0.016 (-)
Fixes	$f_{fix}$	f	0.001 (-)

### 3.3 Modèle thermodynamique

Quatre modifications ont été apportées par rapport au modèle développé dans [Olsommer, 1998]:

- (i) un soutirage de vapeur au niveau de chacune des lignes de turbines à vapeur a été rajouté pour le préchauffage des condensats (cf. figure 3.1);
- (ii) un prélèvement de vapeur vive avant l'entrée dans les turbines pour le chauffage de la bêche alimentaire (cf. figure 3.1);
- (iii) l'utilisation du boiler auxiliaire (BA) uniquement pour le chauffage à distance (CAD);

<sup>26</sup> Electricité et chaleur.

(iv) divers paramètres thermodynamiques rappelés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Valeurs de dimensionnement et d'opération pour divers paramètres du modèle thermodynamique.

Description	Symbole	Valeur
Température de vapeur vive	T	397 (C)
Pression de vapeur vive	p	48 (bar)
Température de la bêche alimentaire	T	131 (C)
Pression de la bêche alimentaire	p	2.79 (bar)

Pour (i), le modèle est aisément adapté en ajoutant un séparateur de flux et un groupe d'étages supplémentaire à chacune des lignes de turbines. Les performances des groupes T1BP et T1HP sont supposées identiques ( $\eta_{sT1HP} = \eta_{sT1BP}$ ). Il en va de même des groupes T2MP et T2BP ( $\eta_{sT2MP} = \eta_{sT2BP}$ ). Les niveaux de pression de soutirage et les parts de débits soutirés sont données dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 – Valeurs de dimensionnement et d'opération pour les paramètres de soutirage des turbines.

Description	Symbole	Valeur
Pression de soutirage (T1)	$p_{ch\ vap\ C1}$	1.3 (bar)
Part du débit soutiré (T1)	$x_{ch\ vap\ C1}$	0.08 (-)
Pression de soutirage (T2)	$p_{ch\ vap\ C2}$	1.3 (bar)
Part du débit soutiré (T2)	$x_{ch\ vap\ C2}$	0.08 (-)

Pour (ii), il a fallu rajouter une procédure itérative pour le calcul du débit prélevé pour le chauffage de la bêche alimentaire (réglage).

Finalement, rappelons (cf. chapitre 3.1) que par souci de simplification du modèle thermodynamique, les deux préchauffeurs des condensats ont été pris en compte comme de simples échangeurs à mélange au niveau de la bêche alimentaire.

Pour les autres modules et procédures de calcul le modèle thermodynamique est en tout point semblable à celui développé dans [Olsommer, 1998].

### 3.4 Modèle de sûreté des systèmes

Le modèle d'analyse de sûreté du système reste en tout point semblable à celui décrit dans [Olsommer, 1998], à l'exception:

- des estimateurs des paramètres de sûreté des équipements (tableau 3.4),
- de la disponibilité minimale du chauffage à distance (tableau 3.5).

L'analyse de sûreté développée dans [Olsommer, 1998] est appliquée ici pour calculer la disponibilité des flux d'énergie. Plusieurs hypothèses sont émises:

- le récupérateur de chaleur, les turbines à vapeur, les aérocondenseurs et l'échangeur de chaleur sont beaucoup plus fiables que les fours, la turbine à gaz et le boiler auxiliaire [Procaccia et Aufort, 1995];
- les pompes sont dédoublées et sont donc parfaitement fiables<sup>27</sup>;
- les fours sont toujours des éléments actifs (i.e. il sont trop onéreux pour être des éléments passifs).

Ainsi l'analyse de la disponibilité ne porte que sur les fours (F1, F2, F3), la turbine à gaz (TG) et le boiler auxiliaire (BA).

Ce chapitre présente les différents paramètres du problème, les procédures d'urgences utilisées et le calcul des flux réels.

#### 3.4.1 Définition du problème

Pour chaque séquence ( $k=1, \dots, K$ ), le problème est défini par le vecteur de synthèse  $(\mathbf{w}_{\text{disp } k} = (w_{F1}, w_{F2}, w_{F3}, w_{TG}, w_{BA})_k)$  et d'opération  $(\mathbf{x}_{\text{disp } k} = (x_{F1}, x_{F2}, x_{F3}, x_{TG}, x_{BA})_k)$  des équipements considérés [Olsommer, 1998, 1999(b)]. La structure  $(\mathbf{w}_{\text{disp } k})$  peut être changée sur les séquences ( $k$ ), alors que

---

<sup>27</sup> A noter que ce dédoublement n'est pas pris en considération dans le calcul des coûts d'achat des équipements dans la mesure où ils ne représentent qu'une part négligeable des coûts.

les divers estimateurs des paramètres de sûreté des équipements sont supposés constants (tableau 3.4).

Tableau 3.4 - Estimateurs des paramètres de sûreté de fonctionnement  
[Procaccia et Aufort, 1995; SAIOD, 1997, SAIDEF, 1998].

Equipement	Défaillance $\hat{\lambda}$ (1/h)	Défaillance au démarrage $\hat{\gamma}$ (1/h)	Réparation $\mu$ (1/h)
F1, F2, F3	494 e-6	34.7 e-6	5.9701 e-3
TG	1400 e-6	83.3 e-6	47.619 e-3
BA	220e-6	27.7 e-6	12.195 e-3

### 3.4.2 Procédures d'urgence

Les procédures d'urgence choisies sont rappelées ci-dessous en tenant compte de la troisième hypothèse ci-dessus:

- **F1:** Si (F2 ou F3) ou (F2 et F3) sont en panne, faire marcher F1 à sa capacité maximale.
- **F2:** Si (F1 ou F3) ou (F1 et F3) sont en panne, faire marcher F2 à sa capacité maximale.
- **F3:** Si (F1 ou F2) ou (F1 et F2) sont en panne, faire marcher F3 à sa capacité maximale.
- **TG:** Si (F1 et F2 et F3) sont en panne, enclencher TG à pleine charge si elle est en attente, et la laisser à son régime opératoire si elle est en fonctionnement.
- **BA:** Si (F1 et F2 et F3) sont en panne et TG est en panne ou n'a pas démarré, enclencher BA à pleine charge s'il est en attente, et le laisser à son régime opératoire s'il est en fonctionnement.

Ces conditions sont présentées pour le cas d'une configuration avec les cinq équipements présents. La procédure peut être adaptée facilement dans tous les autres cas de configuration.

Les procédures d'urgences permettent de construire le graphe des états entiers et de calculer les probabilités ( $\mathcal{P}_i$ ) de se trouver dans chacun des états [Olsommer, 1998].

L'étape suivante consiste à évaluer les flux (i.e. résoudre le modèle thermodynamique  $h=0$ ) pour chacun des états.

### 3.4.3 Flux réels

Avec cinq composants ( $\mathcal{K}=5$ ), le nombre d'états<sup>28</sup> du graphe des états entiers est de 32 [Olsommer, 1998]. Dans une procédure d'optimisation où le temps intervient (K séquences), l'analyse de disponibilité peut devenir très gourmande en temps de calcul si l'on ne fait pas des hypothèses simplificatrices.

Dans la mesure où les probabilités des états ( $i < 2^{\mathcal{K}}$ ) sont plus faibles relativement que l'état de marche total ( $i = 2^{\mathcal{K}}$ ), il est possible de calculer les ( $i = [1, \dots, 2^{\mathcal{K}} - 1]$ ) états en utilisant un modèle thermodynamique simplifié<sup>29</sup>. La démarche est décrite dans la figure 3.4.

Hypothèses:

- la production de vapeur des fours est proportionnelle au débit de déchets incinérés;
- (iii) pour des raisons de capacité de la fosse à ordures ainsi que des raisons sanitaires et de sécurité (feux de fosse), la durée de stockage ( $\Delta t_{\text{stock}}$ ) des déchets ne peut excéder 4 jours pour une séquence d'une saison, en supposant que les fours ne tombent pas en panne plus d'une fois par tranche de 4 mois [SAIOD, 1997];
- (iv) la charge maximale admise par les fours est de 110 (%) (cf. tableau 3.xxx);
- (v) la production d'électricité dans les turbines à vapeur et la turbine à gaz est proportionnelle aux débits;
- (vi) la consommation électrique des pompes est proportionnelle au débit pompé;
- (vii) la consommation électrique des aérocondenseurs est proportionnelle au cube du débit de vapeur.

---

<sup>28</sup> Un état est défini par une configuration de fonctionnement.

<sup>29</sup> Cette hypothèse est vérifiée au chapitre 4.5.4.

La démarche consiste dans un premier temps à évaluer pour chaque état, et en tenant compte des diverses hypothèses et procédures d'urgence, les flux transitant au travers de chaque composant. Ces flux sont ensuite pondérés par les probabilités ( $\mathcal{P}_i$ ) associées, puis sommés. Finalement, les consommations et productions d'énergie sont estimées en admettant les lois de proportionnalité décrites ci-dessus.

Pour chaque état  $i=[2^{\mathcal{K}}, \dots, 1]$  faire

•Fours:

$\dot{m}_{d_i}$		$\dot{m}_{vap_{fours_i}}$
Si tous les fours sont en état de marche, on peut consommer le stock:		
$\sum_{F=1}^{Nb \text{ fours}} \left[ \dot{m}_{d_F} * \left( 1 + \frac{\Delta t_{stock}}{\Delta t} \right) \right]$		$\sum_{F=1}^{Nb \text{ fours}} \left[ \dot{m}_{vap_{Fdim}} * \frac{\dot{m}_{d_F}}{\dot{m}_{d_{Fdim}}} * \left( 1 + \frac{\Delta t_{stock}}{\Delta t} \right) \right]$
Sinon (si au moins un four est en panne), les fours valides sont chargés à plein:		
$\sum_{F=1}^{Nb \text{ fours OK}} \left[ \dot{m}_{d_{Fmax}} \right]$		$\sum_{F=1}^{Nb \text{ fours OK}} \left[ \dot{m}_{vap_{Fdim}} * \frac{\dot{m}_{d_{Fmax}}}{\dot{m}_{d_{Fdim}}} \right]$

•Turbine à gaz, boiler auxiliaire:

$\dot{m}_{BTG_i}$	$\dot{E}_{elTG_i}$	$\dot{m}_{vapTG_i}$		$\dot{m}_{BBA_i}$	$\dot{m}_{vapBA_i}$
Si la (le) TG (BA) est présent(e) et qu'elle (il) est en fonctionnement:					
$\dot{m}_{BTG_i}$	$\dot{E}_{elTG_i}$	$\dot{m}_{vapTG_i}$		$\dot{m}_{BBA_i}$	$\dot{m}_{vapBA_i}$
Si la (le) TG (BA) est présent(e), qu'elle (il) a été sollicité(e) et qu'elle (il) a démarré:					
$\dot{m}_{BTGdim_i}$	$\dot{E}_{elTGdim_i}$	$\dot{m}_{vapTGdim_i}$		$\dot{m}_{BBAdim_i}$	$\dot{m}_{vapBAdim_i}$
Si la (le) TG (BA) est présent(e) et qu'elle (il) ne fonctionne pas:					
0	0	0		0	0

Fin

Figure 3.3 - Calcul des flux pour les  $2^{\mathcal{K}}$  états.

Les flux réels sont déterminés au moyen de la relation:.

$$\dot{\Phi}_{reel} = \sum_{i=1}^{2^{\mathcal{K}}} \mathcal{P}_i \dot{\Phi}_i \quad (3.35)$$



Finalement les règles de proportionnalité permettent de calculer rapidement les autres flux réels de masse et d'énergie, en fonction des flux énumérés à la figure 3.3 (équation 3.36).

$$\dot{\Phi}_{m_{reel}} = \frac{\dot{\Phi}_m}{\left(\dot{\Phi}_n\right)^a} * \left(\dot{\Phi}_{n_{reel}}\right)^a \quad (3.36)$$

Avec  $(_m)$  le flux à évaluer,  $(_n)$  l'un des flux de la figure 3.3, et  $(^a)$  un coefficient valant 1 ou 3 selon les règles de proportionnalité (i, iv, v et vi) décrites ci-dessus.

Remarques:

- Les ordures qui ne peuvent pas être incinérées lorsque l'un ou l'autre des fours tombe en panne peuvent être stockées un certain temps. Lorsque tous les fours sont en état de marche, le stock est consommé sur la durée équivalente à ces états. Sur tous les autres états, i.e. lorsqu'au moins un four est en panne, les fours valides sont supposés fonctionner à pleine charge (110 (%)) pour reprendre une partie des déchets. Le flux réel des déchets calculé selon cette procédure permet donc de tenir compte, sous certaines hypothèses simplificatrices, du stockage possible dans la fosse. Comme les déchets doivent être absolument traités, le solde ( $\dot{m}_{d_{export}}$ ), c'est-à-dire les déchets n'ayant pas pu être incinérés, doivent être exportés vers d'autres installations (équation 3.37), moyennant un certain coût (tableau 3.5).

$$\dot{m}_{d_{export}} = \dot{m}_d - \dot{m}_{d_{reel}} \quad (3.37)$$

- Afin de satisfaire les critères de distribution de chaleur, il est exigé, dans le cahier des charges, que la production de chaleur soit assurée avec une disponibilité limite  $A_{CAD_{min}}$  (tableau 3.5). Il est admis que seul l'état correspondant à la panne simultanée de tous les producteurs de vapeur ne permet plus de satisfaire ni la production d'électricité ni le CAD. La disponibilité du système de CAD est donnée par l'équation (3.38). Si la limite de disponibilité est franchie<sup>30</sup>, la solution est pénalisée [Olsommer, 1998].

$$A_{CAD} = 1 - P_{i=1} \quad (3.38)$$

<sup>30</sup> C'est le cas lorsque le système n'a pas suffisamment de redondance, notamment.

Tableau 3.5 - Paramètres thermoéconomiques de disponibilité.

Description	Symbole	Valeur
Disponibilité minimale du CAD	$A_{CAD_{min}}$	0.99 (-)
Coût spécifique d'exportation des déchets <sup>31</sup>	$c_{export}$	300.0 (CHF/t)

### 3.5 Modèle thermoéconomique

Ce chapitre présente la décomposition de l'horizon économique ( $N_e$ ) en tranches de temps (chapitre 3.5.1). Le modèle thermoéconomique proposé agrège les modèles thermodynamique, économique et de sûreté en une formulation unifiée présentée par les équations (3.39-3.51). Le problème est résolu en décomposant le modèle sur deux niveaux d'optimisation (L1, L2) (cf. chapitre 3.5.2). Le choix des variables indépendantes du problème est décrit au chapitre 3.5.3, puis l'approche utilisée pour dimensionner les principaux équipements (chapitre 3.5.4).

#### 3.5.1 Décomposition en séquences

L'hypothèse est émise que les phénomènes instationnaires sont négligeables et l'intégrale de l'équation 2.1 peut être remplacée par une sommation. La formulation quasi-stationnaire suppose de pouvoir identifier des séquences (intervalles de temps) sur lesquelles tous les paramètres peuvent être admis comme constants. Lorsque ces derniers fluctuent de façon continue et périodique simultanément, le nombre de séquences peut être élevé et le modèle thermoéconomique devient très complexe. Dans ce cas, il convient d'émettre certaines hypothèses afin de limiter le nombre d'intervalles. Pour ce faire, une bonne connaissance a priori du système ou des coûts marginaux ( $\partial C_{tpn}/\partial$  paramètre) permet d'opérer les approximations judicieuses. Une fois la décomposition effectuée pour chaque paramètre, les séquences sur lesquelles les valeurs des différents paramètres sont identiques peuvent être regroupées. La figure (3.4) illustre ces deux opérations (décomposition et regroupement) pour deux paramètres.

<sup>31</sup> Coûts calculés selon [Bösiger et Völgyi, 1995].

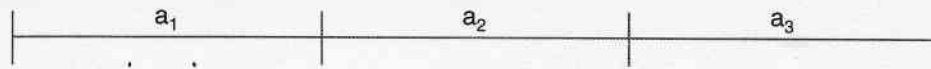
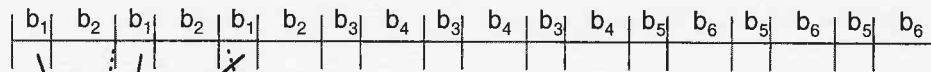
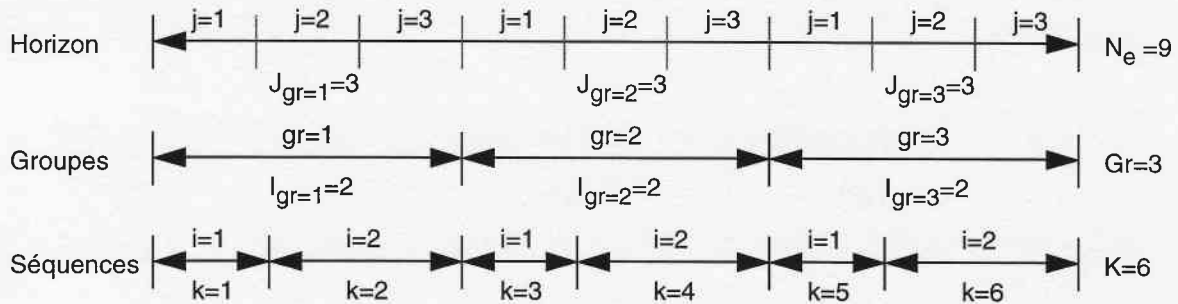
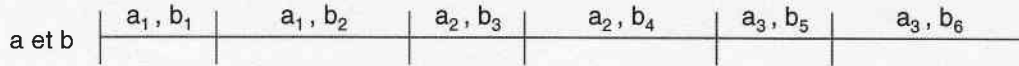
Décomposition pour a :Décomposition pour b :Regroupement de a et b :

Figure 3.4 - Décomposition et regroupement de séquences équivalentes pour deux paramètres  $a$  et  $b$  sur un horizon ( $N_e$ ); description des notions de groupes, de séquences, et de leurs paramètres associés.

## Remarques importantes:

- Il est de coutume de définir les paramètres économiques (taux, facteurs d'actualisation FVP et d'amortissement FRI) sur une base de temps équivalente à une année. Or, si l'opération de regroupement permet de réduire le nombre de séquences, il est important de remarquer qu'elle peut rompre l'ordre chronologique, c'est-à-dire qu'une séquence peut représenter une période inférieure à une année, mais portant sur plusieurs années consécutives ou non.
- A cause de cela, l'acquisition d'équipements ne peut se faire qu'au début de la période déterminée par un groupe.
- Dans la formulation quasi-stationnaire de la fonction objectif (équations 3.39-3.51), il faut prendre garde d'actualiser chaque séquence sur le nombre d'années correspondant au groupe.

Le nombre de groupes ( $Gr$ ) (figure 3.4) est toujours inférieur ou égal au nombre d'années de l'horizon économique ( $N_e$ ). Le concept de groupe est utile pour

l'optimisation du système (configuration, dimensionnement et opérations) car il permet de réduire le nombre de sous-problèmes d'optimisation [Olsommer, 1998]. Dans ce contexte, compte tenu des différentes composantes des coûts totaux présent nets  $C_{tpn}$ , la formulation quasi-stationnaire de la fonction objectif du problème d'optimisation thermoéconomique (équation 2,1) d'un système composé de E équipements sur le groupe de séquences (gr), de R ressources et de P revenus sur les séquences (i) de chaque groupe (gr) (figure 3.4) peut s'écrire:

$$\min C_{tpn}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t) = C_{CTI} + C_{dep} + C_{res} - C_{rev} + C_{maint} + C_{ass} + C_{tax} + C_{fix} \quad (3.39)$$

par rapport à  $\mathbf{z}, t$

$$\text{sous contraintes} \quad \mathbf{h}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t_k) = \mathbf{0} \quad (3.40)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t_k) \leq \mathbf{0} \quad (3.41)$$

$$\mathbf{L}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t_k) = \mathbf{VRAI} \quad (3.42)$$

avec  $k = 1, \dots, K$ . Le nombre de séquences (K) sur l'horizon ( $N_e$ ) est donné par (figure 3.4):

$$K = \sum_{gr}^{Gr} I_{gr} \quad (3.43)$$

où Gr est le nombre de groupes et  $I_{gr}$  le nombre de séquences sur chaque groupe (gr) (figure 3.4). Les différents membres de droite de l'équation (3.39) peuvent s'écrire:

$$C_{CTI}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t) = \sum_{gr}^{Gr} \left\{ \sum_e^E [\dot{C}_{CTI}]_e \sum_j^J [FVP(N, i_m)]_j \right\}_{gr} \quad (3.44)$$

$$C_{dep}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t) = \sum_{gr}^{Gr} \left\{ \dot{C}_{dep} \sum_j^J [FVP(N, i_m)]_j \right\}_{gr} \quad (3.45)$$

$$C_{res}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t) = \sum_{gr}^{Gr} \left\{ \sum_i^I \left[ \sum_r^R (\dot{C}_{res})_r \Delta t \right]_i \sum_j^J [FVP(N, i_m)]_j \right\}_{gr} \quad (3.46)$$

$$C_{rev}(z, y, t) = \sum_{gr} \left\{ \sum_i \left[ \sum_p (\dot{C}_{rev})_p \Delta t \right]_{ji} \sum_j [FVP(N, i_m)]_j \right\}_{gr} \quad (3.47)$$

$$C_{maint}(z, y, t) = \sum_{gr} \left\{ \dot{C}_{maint} \sum_j [FVP(N, i_m)]_j \right\}_{gr} \quad (3.48)$$

$$C_{ass}(z, y, t) = \sum_{gr} \left\{ \dot{C}_{ass} \sum_j [FVP(N, i_m)]_j \right\}_{gr} \quad (3.49)$$

$$C_{tax}(z, y, t) = \sum_{gr} \left\{ \dot{C}_{tax} \sum_j [FVP(N, i_m)]_j \right\}_{gr} \quad (3.50)$$

$$C_{fix}(z, y, t) = \sum_{gr} \left\{ \dot{C}_{fix} \sum_j [FVP(N, i_m)]_j \right\}_{gr} \quad (3.51)$$

avec  $\dot{C}$  en (CHF/s ou CHF/an),  $\Delta t_i = \Psi_i \Delta t_{1an}$  en secondes,  $\Psi_i \in ]0, \dots, 1]$ ,  $\sum_i \Psi_i = 1$  et  $I$

le nombre de séquences (i) du groupe (gr) sur la période d'une année ( $\Delta t_{1an}$ ).  $J_{gr}$  représente le nombre de périodes d'une année ( $\Delta t_{1an}$ ) pour le groupe (gr) (figure 3.4).

### 3.5.2 Procédure d'optimisation à deux niveaux

L'optimisation simultanée de la configuration, du dimensionnement et des opérations définit un problème de type MINLP dépendant du temps qui peut être approximé par une formulation quasi-stationnaire composée d'un nombre minimal de séquences.

#### **Formulation du problème:**

La formulation du problème d'optimisation (équations 3.39-3.51) laisse apparaître que si tous les termes de la fonction objectif (équation 3.35) dépendent du temps, seuls les coûts des ressources (équation 3.46) les revenus (équation 3.47) dépendent du niveau des opérations. Dans ce contexte, il est utile de faire la

distinction entre les variables indépendantes de configuration-dimensionnement, notées  $\mathbf{w}$ , et celles d'opérations, notées  $\mathbf{x}_k$ . Cette distinction permet de récrire la formulation du problème d'optimisation sous la forme:

$$\begin{aligned} \min C_{\text{tpn}}(\mathbf{w}, \mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = & \left[ C_{\text{CTI}}(\mathbf{w}, \mathbf{y}, t) + C_{\text{dep}}(\mathbf{w}, \mathbf{y}, t) + C_{\text{maint}}(\mathbf{w}, \mathbf{y}, t) + \right. \\ & C_{\text{ass}}(\mathbf{w}, \mathbf{y}, t) + C_{\text{tax}}(\mathbf{w}, \mathbf{y}, t) + C_{\text{fix}}(\mathbf{w}, \mathbf{y}, t) \Big]_{L_1} + \\ & \sum_k^K [C_{\text{res}}(\mathbf{w}, \mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k, t_k) - C_{\text{rev}}(\mathbf{w}, \mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k, t_k)]_{L_2} \end{aligned} \quad (3.52)$$

par rapport à  $\mathbf{z} = \{\mathbf{w}, \mathbf{x}_k\}, t_k \quad k=1, \dots, K$

$$\text{sous contraintes} \quad [h(\mathbf{w}, \mathbf{y}, t)]_{L_1} = 0, [h(\mathbf{w}, \mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k, t_k)]_{L_2} = 0 \quad (3.53)$$

$$[g(\mathbf{w}, \mathbf{y}, t)]_{L_1} \leq 0, [g(\mathbf{w}, \mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k, t_k)]_{L_2} \leq 0 \quad (3.54)$$

$$[L(\mathbf{w}, \mathbf{y}, t)]_{L_1} = \text{VRAI}, [L(\mathbf{w}, \mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k, t_k)]_{L_2} = \text{VRAI} \quad (3.55)$$

Toutes les variables et les termes du niveau structurel ( $L_1$ ) sont uniques sur tout l'horizon ( $N_e$ ) du problème, alors que ceux du niveau opérationnel ( $L_2$ ) peuvent différer d'une séquence ( $k$ ) à l'autre.

Défini de cette façon, le problème d'optimisation fait clairement ressortir les deux niveaux d'optimisation dont l'interdépendance est la suivante (figure 3.5). Pour chaque choix de variables  $\mathbf{w}$  (niveau  $L_1$ ), lorsque les  $K$  séquences (tranches de temps) sont indépendantes les unes par rapport aux autres, correspondent  $K$  sous-problèmes qui doivent être optimisés par rapport aux variables  $\mathbf{x}_k$ .

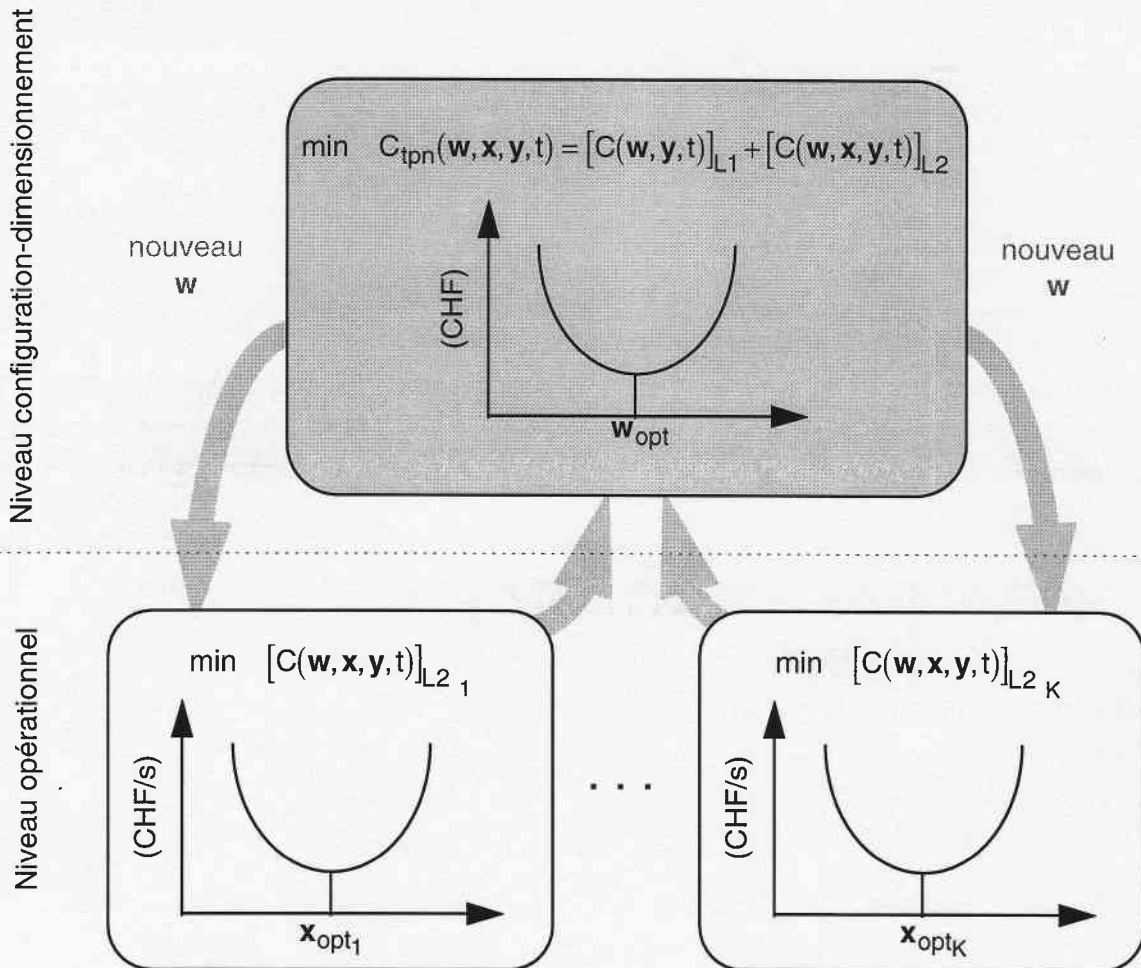


Figure 3.5 - Procédure d'optimisation à deux niveaux.

Les variables indépendantes de configuration-dimensionnement ( $w$ ) peuvent représenter:

- la date d'acquisition (variable entière [0,1,2,...]) d'un équipement;
- une option de la superconfiguration (variable binaire [0,1]);
- tout autre paramètre de dimensionnement (variables réelles), notamment la taille d'un équipement, ses paramètres de dimensionnement et ses conditions nominales de fonctionnement.

Les variables indépendantes d'opération ( $x$ ) caractérisent:

- des options de fonctionnement à caractère discret (variable binaire [0,1]), comme les états *on/off* d'un équipement ou d'une vanne tout-ou-rien, notamment;

- le réglage en continu des paramètres opératoires du système (variables réelles), comme les consignes d'appareils de régulation (ouverture d'une vanne, niveaux de pression, de température, commande d'un moteur électrique, etc.).

**Remarques:**

- La décomposition du problème initial en un problème sur deux niveaux rend le problème plus simple à résoudre car le nombre de variables par sous-problème est réduit.
- Le temps CPU peut être considérablement accru. Soit  $N_w$  le nombre de variables  $w$  et  $N_x$  le nombre de variables  $x_k$  par intervalle de temps (séquence). En supposant que le temps de calcul est proportionnel à une puissance ( $\beta > 1$ ) du nombre de variables, le rapport des temps CPU entre une procédure sur deux et sur un seul niveau est donné par:

$$\frac{\text{CPU}_{2\text{ niveaux}}}{\text{CPU}_{1\text{ niveau}}} = \frac{[N_w^\beta] [K (N_x)^\beta]}{(N_w + K N_x)^\beta} > 1 \quad \text{tant que} \quad \frac{N_w N_x}{N_w + K N_x} > 1 \quad (3.56)$$

- Dans ce contexte, une attention particulière doit être portée à la façon dont est implémenté le modèle thermodynamique sur le niveau opérationnel (L2) afin de limiter le temps de calcul.
- Lorsque le temps intervient, il est impossible de traiter le problème d'optimisation de la configuration, du dimensionnement et des opérations sur un seul niveau, car chaque vecteur de configuration-dimensionnement définit une nouvelle structure, c'est-à-dire de nouvelles contraintes opérationnelles, de nouvelles bornes sur les variables indépendantes, et donc un nouveau problème d'optimisation. Les opérations ne peuvent ainsi pas être optimisées. Le seul moyen de le faire est de figer la structure, c'est-à-dire décomposer le problème sur deux niveaux.



### 3.5.3 Variables indépendantes et contraintes d'inégalité

#### 3.5.3.1 Variables indépendantes

Les variables indépendantes du problème d'optimisation décrit par les équations (3.52-3.55) sont données ci-dessous pour le niveau structurel (L1) et pour le niveau opérationnel (L2).

##### 3.5.3.1.1 Niveau structurel (L1)

Pour le niveau structurel (configuration-dimensionnement), les variables indépendantes (**w**) choisies sont énumérées dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 - Liste des variables indépendantes du niveau structurel (L1).

Description	Symbole	Borne inf.	Borne sup.	Unité
Variables entières ou binaires <sup>32</sup>				
Date d'achat du four 1 <sup>33</sup>	$\delta_{F1}$	1	1	(-)
Date d'achat du four 2	$\delta_{F2}$	0	4	(-)
Date d'achat du four 3	$\delta_{F3}$	0	4	(-)
Date d'achat de la turbine à gaz	$\delta_{TG}$	0	4	(-)
Présence du récupérateur de chaleur <sup>34</sup>	$\delta_{RC}$	0	1	(-)
Date d'achat du boiler auxiliaire	$\delta_{BA}$	0	4	(-)
Date d'achat de la ligne turbine à condensation <sup>35</sup>	$\delta_{T1}$	0	4	(-)
Date d'achat de la ligne turbine à extraction	$\delta_{T2}$	0	4	(-)

<sup>32</sup>  $\delta=0$  signifie que l'équipement est absent.

<sup>33</sup> Cette variable est en fait fixée, dans la mesure où la centrale doit au moins comporter un four d'incinération.

<sup>34</sup> Variable binaire car le RC n'a de raison d'être que si la TG est présente.

<sup>35</sup> Pour respecter le cahier des charges [SAIDF, 1998], il est admis que la centrale doit être équipée d'une turbine à vapeur au minimum.

Tableau 3.6 (suite) - Liste des variables indépendantes du niveau structurel (L1).

Variables réelles				
Turbine à gaz (TG):				
Débit de combustible	$\dot{m}_{B_{TG}}$	0.0	1.4	(kg/s)
Rapport de pression	$\Pi_{TG}$	6.0	22.0	(K)
Rendement isentrope compresseurs	$\eta_{s_{K_{TG}}}$	0.75	0.9	(-)
Rendement isentrope turbines	$\eta_{s_{T_{TG}}}$	0.85	0.93	(-)
Récupérateur de chaleur (RC):				
Pincement	$\Delta T_{pinch_{RC}}$	10.0	25.0	(K)
Fours d'incinération (F1,F2,F3):				
Sur(-sous)dimesionnement des fours	$x_F$	0.7	1.0	(-)
Nombre de jours de stockage	$n_{stock}$	1.0	21.0	(jours)
Chauffage à distance (CAD):				
Soutirage haute pression	$x_{sout}$	0.0	1.0	(-)
Pincement	$\Delta T_{pinch_{CAD}}$	1.0	3.0	(K)
Lignes de turbines à vapeur				
Répartition vers turbine à extraction	$x_{T2HP}$	0.0	1.0	(-)
Ligne de turbine à condensation (T1)				
Rendement isentrope	$\eta_{s_{T1HP}}$	0.7	0.95	(-)
Pression de condensation	$p_{cond_{T1}}$	0.06	0.5	(bar)
Pincement au condenseur (C1)	$\Delta T_{pinch_{C1}}$	5.0	30.0	(K)
Turbine à extraction				
Rendement isentrope étages haute pression	$\eta_{s_{T2HP}}$	0.7	0.95	(-)
Pression d'extraction	$p_{extr}$	1.6	3.5	(bar)
Rendement isentrope étages basse pression	$\eta_{s_{T2BP}}$	0.7	0.95	(-)
Pression de condensation	$p_{cond_{T2BP}}$	0.06	0.5	(bar)
Pincement au condenseur (C2)	$\Delta T_{pinch_{C2}}$	5.0	30.0	(K)

Pour répondre aux cahier des charges du projet Posieux, une série de variables indépendantes du modèle thermoéconomique développé par [Olsommer, 1998] ont été fixées à des valeurs prédéterminées. Elles sont rappelées dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 - Liste des variables indépendantes du niveau structurel (L1) fixées.

Description	Symbole	Valeur	Unité
Variables entières ou binaires <sup>36</sup>			
Injection directe dans les fours <sup>37</sup>	$\delta_{inj}$	0	(-)
Variables réelles			
Boiler auxiliaire (BA):			
Débit de combustible	$\dot{m}_{BA}$	0.135	(kg/s)
Efficacité	$\epsilon_{BA}$	0.95	(-)
Fours d'incinération (F1,F2,F3):			
Taux de dilution dans le four 1	$x_{airF1}$	1.0	(-)
Taux de dilution dans le four 2	$x_{airF2}$	1.0	(-)
Taux de dilution dans le four 3	$x_{airF3}$	1.0	(-)

<sup>36</sup>  $\delta=0$  signifie que l'équipement est absent.

<sup>37</sup> Même remarque que pour le RC.

### 3.5.3.1.2 Niveau opérationnel (L2)

Pour le niveau opérationnel, les variables indépendantes ( $x_k$ ) sont résumées dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 - Liste des variables indépendantes du niveau opérationnel (L2).

Description	Symbole	Borne inf.	Borne sup.	Unité
Variables binaires <sup>38</sup>				
Fonctionnement de la turbine à gaz	$\delta_{TG}$	0	1	(-)
Fonctionnement du boiler auxiliaire	$\delta_{BA}$	0	1	(-)
Variables réelles				
Turbine à gaz (TG):				
Charge	$x_{TG}$	0.6	1.0	(-)
Boiler auxiliaire (BA)				
Charge	$x_{BA}$	0.0	1.0	(-)
Chauffage à distance				
Soutirage haute pression	$x_{sout}$	0.0	1.0	(-)
Lignes de turbines à vapeur				
Répartition vers turbine à extraction	$x_{T2HP}$	0.0	1.0	(-)
Ligne de turbine à condensation (T1)				
Pression de condensation	$p_{condT1}$	0.06	0.5	(bar)
Ligne de turbine à extraction (T2)				
Pression d'extraction	$p_{extr}$	1.6	3.5	(bar)
Pression de condensation	$p_{condT2BP}$	0.06	0.5	(bar)

Pour répondre aux cahier des charges du projet Posieux, une série de variables indépendantes du modèle thermoéconomique développé par [Olsommer, 1998] ont été fixées à des valeurs prédéterminées. Elles sont rappelées dans le tableau 3.9.

<sup>38</sup>  $\delta=0$  signifie que l'équipement est à l'arrêt.

Tableau 3.9 - Liste des variables indépendantes du niveau opérationnel (L2) fixées.

Description	Symbole	Valeur	Unité
Variables entières ou binaires <sup>39</sup>			
Fonctionnement du récupérateur de chaleur	$\delta_{RC}$	1	(-)
Variables réelles			
Fours d'incinération (F1,F2,F3):			
Charge four 1	$x_{F1}$	1.0	(-)
Charge four 2	$x_{F2}$	1.0	(-)
Taux de dilution dans le four 3	$x_{airF3}$	1.0	(-)

### 3.5.3.2 Contraintes d'inégalité

Les algorithmes d'optimisation de type génétique ne permettent pas de traiter directement les contraintes d'inégalité car ils ne regardent que la valeur de la fonction objectif. Pour s'assurer que les contraintes d'inégalité soient respectées la procédure consiste à avoir recours à des fonctions de pénalité ( $P=P(g)$ ) qui biaisent (pénalisent) la fonction objectif et évitent de sortir du domaine de faisabilité. La première de ces fonctions consiste à ajouter à la fonction objectif une constante, généralement très élevée:

$$P = 10^{20} \quad (3.57)$$

Ce type de pénalité a pour conséquence d'éliminer très rapidement les individus se trouvant à proximité de la région d'infaisabilité. Il doit être évité dans la mesure du possible car il empêche l'algorithme d'optimisation de s'approcher des limites de la contrainte. Toutes les autres fonctions de pénalités interviennent comme des multiplicateurs des différents paramètres énumérés ci-dessus. Dans ce cas les fonctions peuvent être de type linéaire (équation 3.58), logarithmique (équation 3.59), puissance (équation 3.60), exponentielle (équation 3.61), etc..

$$P = a (g+1) \quad a = \text{cste} \quad \forall g > 0 \quad (3.58)$$

$$P = a [1 + \ln(g+1)] \quad a = \text{cste} \quad \forall g > 0 \quad (3.59)$$

$$P = a [\text{abs}(g)]^b \quad a, b = \text{cstes} \quad \forall g > 0 \quad (3.60)$$

<sup>39</sup>  $\delta=0$  signifie que l'équipement est à l'arrêt.

$$P = a e^g \qquad a = \text{cste} \qquad \forall g > 0 \qquad (3.61)$$

Au contraire de la fonction logarithmique, les fonctions de pénalité puissance et exponentielle ont la particularité de peu pénaliser pour de légères violations de contrainte ( $0 < g \leq 1$ ), et beaucoup plus pour de fortes violations ( $g > 1$ ).

Dans ce travail, la pénalité incrémentale (équation 3.57) est utilisée lorsque le système d'équations ( $\mathbf{h}=\mathbf{0}$ ) n'admet pas de solution. La pénalité linéaire est utile pour évaluer le coûts d'équipements virtuels supplémentaires, et la pénalité puissance, lorsqu'il s'agit de pénaliser des caractéristiques de fonctionnement. Les pénalités logarithmiques sont choisies pour les contraintes portant sur des bilans de masse, notamment, et les pénalités exponentielles pour des contraintes de fonctionnement (températures, pressions, etc.).

Remarque: Il faut garder à l'esprit que la solution fournie par l'optimisation peut violer l'une ou l'autre des contraintes. Pour cela, il convient dans tous les cas de vérifier chaque solution du problème d'optimisation.

Les valeurs des contraintes sont rigoureusement les mêmes que celles fournies dans [Olsommer, 1998]. Elles ne sont pas rappelées ici.

### 3.5.4 Dimensionnement des équipements

Les équipements peuvent être acquis au début de chaque groupe de séquences (cf. chapitre 3.5.1). Leur taille se détermine en fonction de leur charge nominale. Pour la turbine à gaz et le boiler auxiliaire, le débit de combustible détermine la taille du composant. Pour les fours, les lignes de turbines à vapeur et l'échangeur de chaleur du CAD, la procédure est différente.

#### ***Fours d'incinération:***

La taille des fours est déterminée par la quantité de déchets à incinérer. Comme la configuration n'est pas figée et que les équipements peuvent être acquis à des périodes différentes, la procédure de dimensionnement doit tenir compte de deux aspects:

- l'allure de la courbe évolutive de déchets à traiter sur l'horizon économique ( $N_e$ );
- la redondance des fours.



La figure 3.6 illustre un exemple de dimensionnement des fours dans le cas d'une double acquisition ( $\mathcal{N}=2$ ) au premier groupe ( $gr=1$ ) et une troisième au second groupe ( $gr=2$ ).

### ***Turbines à vapeur:***

Pour les lignes de turbines à vapeur (T1, T2, C1, C2, P1, P2) (cf. figure 3.1), la procédure est rigoureusement identique à celle des fours.

La quantité de vapeur de dimensionnement pour l'étage basse pression (T2BP) de la turbine à extraction (T2) est supposée égale à celui de la haute pression (T2HP) de façon à ce qu'elle puisse (ainsi que l'aérocondenseur C2 et la pompe d'extraction P2) fonctionner à débit d'extraction très réduit (été).

### ***Aérocondenseurs:***

Les aérocondenseurs sont dimensionnés pour la charge saisonnière maximale, c'est-à-dire pour l'été (température (T) de l'air maximale<sup>40</sup>).

### ***Echangeur de chaleur du CAD:***

La puissance de dimensionnement du réseau de chauffage à distance est calculée sur la base des courbes de "degrés-jours" du site étudié. Partant du principe que les puissances opératoires moyennes ( $\dot{Q}_{\text{hiver}}$ ) pour l'hiver sont données, et en supposant que la puissance de chauffe des bâtiments est proportionnelle à la différence entre la température de chauffage ( $T_c$ ) et la température extérieure (T), il est possible de déterminer la puissance de dimensionnement ( $\dot{Q}_{\text{dim}}$ ) au moyen de l'équation (3.64)<sup>41</sup>.

$$\frac{\dot{Q}_{\text{dim}}}{\dot{Q}_{\text{hiver}}} = \frac{T_c - T_{\text{dim}}}{\frac{1}{N} \int_N \left\{ 0_{|T > T_{\text{nc}}}, (T_c - T)_{|T \leq T_{\text{nc}}} \right\} dj} \quad (3.64)$$

Avec  $T_{\text{dim}}$ , la température de dimensionnement des chauffages des bâtiments,  $T_{\text{nc}}$ , la température de non-chauffage [Norme SIA, 1982], j, un jour, et N, le nombre de

<sup>40</sup>  $T=25$  (C).

<sup>41</sup> Avec  $\dot{Q}_{\text{hiver}} = \max \{ \dot{Q}_{\text{hiver}} \}_{k=1, \dots, K}$



jours de la saison de chauffage. Pour les environs de Neuchâtel (Suisse), l'équation (3.64) vaut 1.463 (figure 3.7).

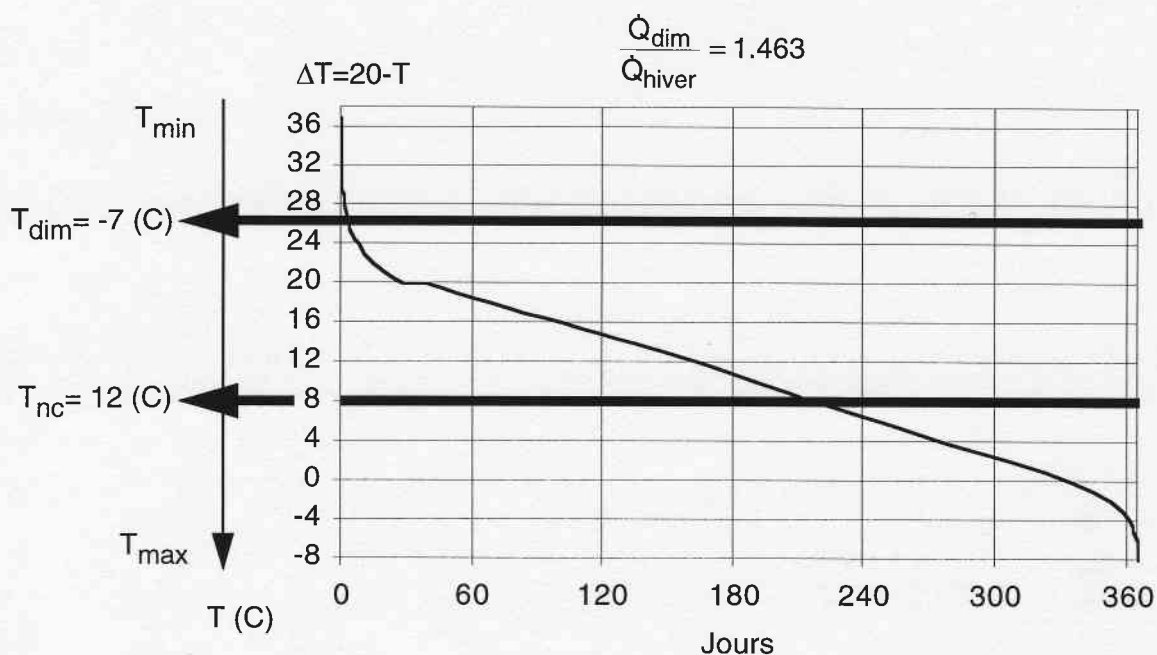


Figure 3.7 - Courbe des "degrés-jours" pour Neuchâtel (Suisse) [Norme SIA, 1982] et température de dimensionnement ( $T_{\text{dim}}$ ) et de non chauffage ( $T_{\text{nc}}$ ).

### 3.6 Scénario

Pour le système étudié dans ce travail, il apparaît que les paramètres varient de façon périodique au fil des saisons, et de façon continue au fil des années. Basé sur les allures typiques des courbes évolutives de ces paramètres (scénarios) [Olsommer, 1998, SAIDEF, 1998], une année peut être décomposée en trois périodes de durées équivalentes (4 mois): hiver (novembre-février), mi-saison (septembre-octobre, mars-avril) et été (mai, août). Avec un horizon économique  $N_e = 25$  ans, cela signifie qu'une soixantaine de séquences sont nécessaires. Pour simplifier le problème, il est admis que l'horizon ( $N_e = 25$ ) peut être correctement représenté par ( $Gr = 4$ ) groupes de ( $J_{GR} = 6, 6, 6$ , et 7) années respectivement, soit seulement ( $K = 12$ ) séquences (tableau 3.10).

Tableau 3.10 - Paramètres temporels du modèle thermoéconomique ( $N_e=25$ ).

Description	Symbole	Valeur
Nombre de groupes	Gr	4
Nombre d'années par groupe	J	6,6,6,7
Nombre de séquences par groupe	I	3
Durée relative d'une séquence	$\Psi_{i=1,2,3}$	1/3
Nombre de séquences	K	12

Pour les divers paramètres variables du problème, un résumé du scénario énergétique et économique retenu<sup>42</sup> est fourni dans le tableau 3.11.

Tableau 3.11 - Résumé des scénarios énergétiques et économiques.  
(H=hiver, M=mi-saison, E=été)

Groupe (gr)	1			2			3			4		
Années	2000 - 2005			2006 - 2011			2012 - 2017			2018 - 2024		
Séquence (k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Saison	H	M	E	H	M	E	H	M	E	H	M	E
Durée (h)	17520	17520	17520	17520	17520	17520	17520	17520	17520	20440	20440	20440
$T_{ext}$ (C)	2	9	16	2	9	16	2	9	16	2	9	16
$\dot{Q}_{CAD}$ (MW)	2.2	1.15	0.34	6.07	3.17	0.94	6.33	3.31	0.98	6.33	3.31	0.98
$\dot{m}_d$ (kg/s)	2.44	2.44	2.44	2.69	2.69	2.69	2.77	2.77	2.77	2.85	2.85	2.85
$\Delta h_0$ (MJ/kg)	12.68	12.68	12.68	12.87	12.87	12.87	13.07	13.07	13.07	13.28	13.28	13.28
$c_m$ (CHF/kg)	0.165	0.165	0.165	0.181	0.181	0.181	0.197	0.197	0.197	0.218	0.218	0.218
$c_{gaz}$ (CHF/kg)	0.326	0.326	0.326	0.34	0.34	0.34	0.353	0.353	0.353	0.369	0.369	0.369
$c_{el}$ (CHF/kWh)	0.0783	0.0575	0.0386	0.0828	0.0608	0.0409	0.0906	0.0665	0.0447	0.0998	0.0733	0.0493
$c_{CAD}$ (CHF/kWh)	0.0081	0.0081	0.0081	0.0083	0.0083	0.0083	0.0086	0.0086	0.0086	0.0089	0.0089	0.0089
$f_{M\&S}$ (-)	1105			1208			1321			1444		

Avec  $T_{ext}$ , la température extérieure moyenne,  $\dot{Q}_{CAD}$ , la demande de chaleur au niveau du réseau de chauffage à distance,  $\dot{m}_d$ , le débit de déchets à traiter,  $\Delta h_0$ , le pouvoir énergétique des déchets,  $c_m$ , le coût unitaire du mazout léger,  $c_{gaz}$ , le coût

<sup>42</sup> Ce scénario n'a pas la prétention d'être exact. Il est du reste évident que s'il devait être sujet à des modification majeures, la validité des résultats en serait affectée. Néanmoins, l'outil développé pourrait être aisément utilisé à des fins d'études de sensibilité de paramètres clés.

unitaire du gaz naturel,  $c_{ej}$ , le coût de vente unitaire de l'électricité,  $c_{CAD}$ , le coût de vente unitaire de la chaleur,  $f_{M\&S}$ , l'index de Marshall&Swift.

## 4. Résultats

### 4.1 Résultats numériques

L'analyse des résultats est organisée en deux parties. Une première partie (chapitre 4.1.1) a pour but de dégager les principales tendances au niveau de la configuration de la centrale en regardant l'ensemble de la population utilisée par l'algorithme génétique (AG). Une seconde partie (chapitre 4.1.2) fournit une analyse détaillée de la solution optimale.

#### 4.1.1. Analyse générale

##### Evolution des populations et formation des niches (niveau L1):

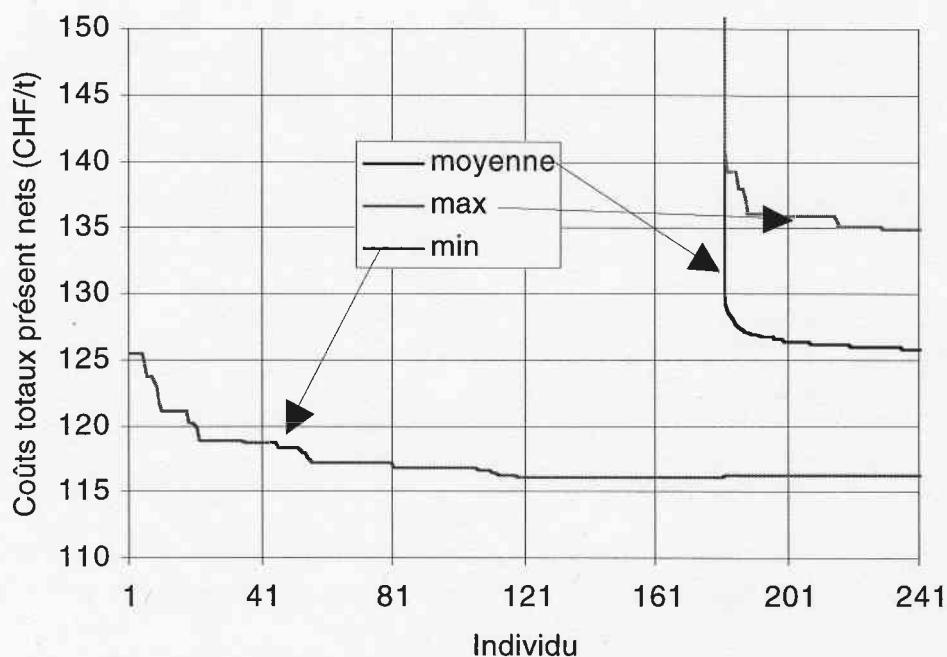
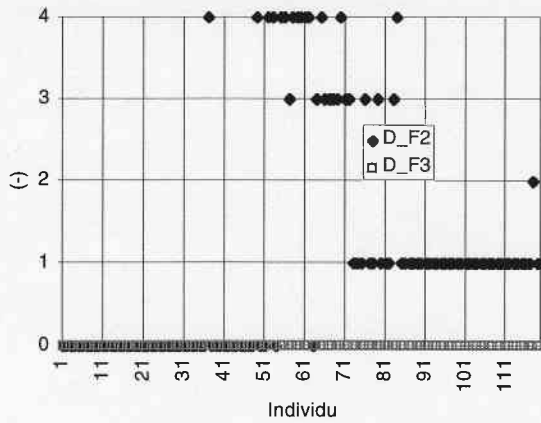
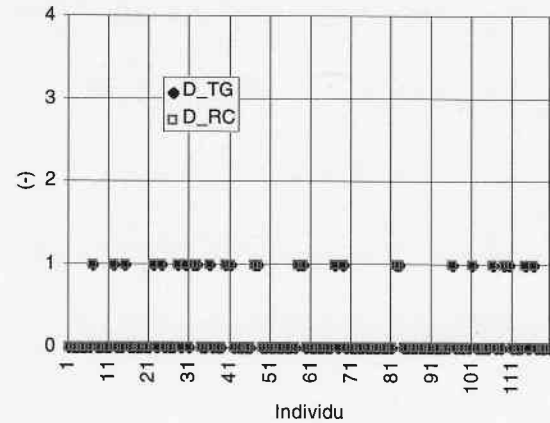


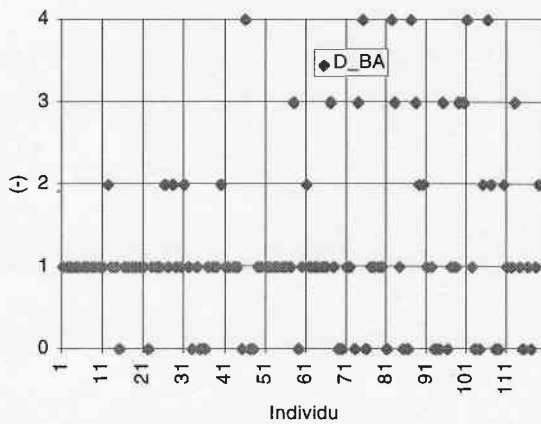
Figure 4.1 - Résultats statistiques de l'évolution des populations sur les différentes générations (niveau L1).



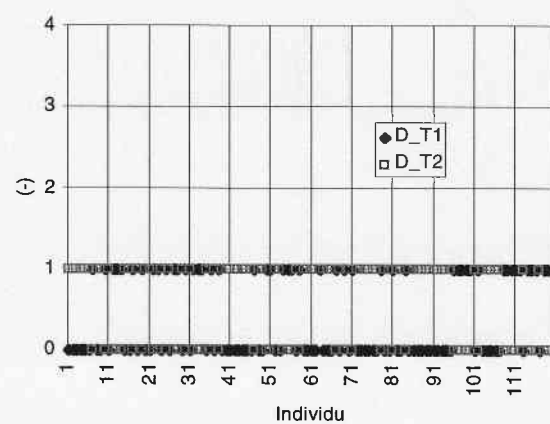
(a) Date d'achat des fours F2 (D\_F2) et F3 (D\_F3).



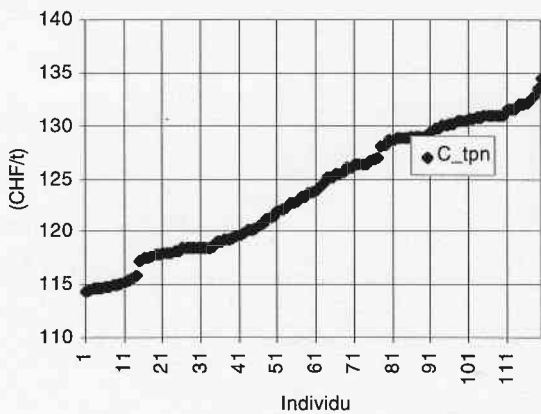
(b) Date d'achat de la turbine à gaz (D\_TG) et présence du récupérateur de chaleur (D\_RC).



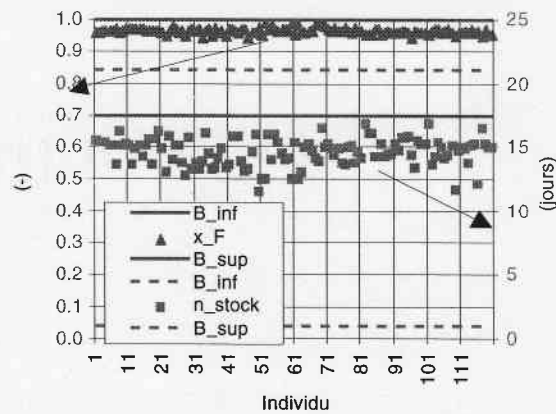
(c) Date d'achat du boiler auxiliaire (D\_BA).



(d) Date d'achat des turbines (D\_T1, D\_T2).



(e) Distribution de la fonction objectif pour la dernière génération.



(f) Sur(sous)dimensionnement des fours ( $x_F$ ) et durée de stockage des déchets ( $n_{stock}$ ).

Figure 4.2 – Niches de solutions du niveau L1 pour la dernière génération (itération).

Les paramètres des algorithmes génétiques (niveau L1 et L2) sont identiques à ceux choisis dans [Olsommer, 1998]. Comme le montre la figure 4.1, l'AG utilisé sur le niveau L1 (Struggle modifié) converge relativement lentement vers l'optimum. Cette tendance est en fait une caractéristique typique des AG à formation d'espèces (*niching*) (cf. [Olsommer, 1998]). Il apparaît sur la figure 4.1 qu'il a fallu environ 180 générations pour que les très mauvaises solutions (i.e. au  $C_{tpn}$  très élevé) disparaissent.

### **Analyse des principales niches de solutions:**

La population conserve une importante diversité<sup>43</sup> au fil des générations<sup>44</sup>. La figure 4.2 et les figures de l'Annexe A.II permettent de dégager les tendances des principales niches de solutions. Précisons qu'il s'agit avant tout de tendances et que la réalité est plus nuancée, notamment à cause des variables réelles et du double niveau d'optimisation<sup>45</sup> :

- Les solutions de la dernière génération montrent la tendance nette à n'avoir qu'une seule ligne de four, ceci malgré la perte en disponibilité du système. La figure 4.2 (a) montre clairement que les parmi les 70 meilleures solutions, aucune ne possède deux lignes de fours au début ( $\delta_{F1} = 1$ ,  $\delta_{F2}, \delta_{F3} = 0$  ou  $>2$ ) et que les 50 plus mauvaises solutions sont toutes caractérisées par la présence de plusieurs lignes d'incinérateurs. Notons que les différences de coûts (figure 4.1 (e)) sont comprises dans une fourchette d'environ 20 (CHF/t).
- Autre fait notoire, il apparaît que la turbine à gaz (TG) n'est pas forcément rentable (figure 4.1 (b)). Dans le contexte du scénario énergétique et économique choisi (cf. chapitre 3.6) et pour la gamme de puissance de TG choisie ( $\leq 20$  MWél), la présence d'un cycle combiné (i.e. avec TG), s'il améliore assurément

---

<sup>43</sup> Pour l'AG Struggle modifié, la diversité de la population n'est pas directement caractérisée par le nombre de configurations, mais par la distance phénotypique normalisée ( $\Delta$ ) entre les individus [Olsommer, 1998] qui permet de déterminer le degré de "parenté" (ressemblance) entre deux individus.

<sup>44</sup> Le nombre de configurations possibles du problème traité ici est très élevé, principalement à cause des variables entières. Ainsi, il n'est pas étonnant de conserver un nombre important de configurations.

<sup>45</sup> Chaque solution du problème (L1) résulte entre autres de la résolution des K sous-problèmes d'optimisation (L2) dont l'optimalité des solutions est entachée d'une certaine incertitude.

les performances thermodynamique du système [Olsommer, 1998], ne semble pas apporter le gain substantiel attendu. Cette tendance est due en partie à l'absence de réseau gazier à proximité directe de l'usine conduisant à une importante majoration des coûts de la TG ( $\sim 2$  (CHF/t)).

- Il est intéressant de relever que le boiler auxiliaire, s'il n'a pas le même impact sur les coûts du système que les fours, notamment, semble être un élément nécessaire de la configuration (figure 4.1 (c)). Il assure la disponibilité minimale requise pour la fourniture de chaleur au réseau de chauffage à distance.
- A la figure 4.1 (d), il apparaît clairement que toutes les solutions (après 240 générations) ne comportent qu'une seule ligne (T1 ou T2). Quant au choix du type de turbine, les différences de coûts entre une ligne de turbine sans et avec extraction ne sont pas si marquées, même si la tendance est à préférer l'option avec extraction. Les calculs montrent<sup>46</sup> que lorsque l'option sans extraction est choisie, le boiler auxiliaire est sollicité plus fréquemment que pour l'option avec extraction. Même si les deux options sont relativement proche d'un point de vue économique, la solution avec extraction est la plus rationnelle d'un point de vue thermodynamique et environnemental, notamment.
- La corrélation entre dimensionnement des fours et volume de stockage de la fosse apparaît clairement à la figure 4.1 (f). Pour toutes les solutions de la dernière génération, la fosse à déchets est dimensionnée pour une durée de stockage d'environ deux semaines. En conséquence, compte tenu des paramètres de sûreté des fours, ces derniers peuvent être légèrement sous-dimensionnés ( $x_F \approx 0.96$ ).<sup>47</sup>

---

<sup>46</sup> Les détails de ceux-ci ne sont pas fournis dans ce rapport pour ne pas trop allourdir son contenu.

<sup>47</sup> Relevons que ce point met en avance l'intérêt de procéder à une analyse de sûreté du système telle que celle effectuée dans cette étude.

### Comparaison des dix meilleurs individus (solutions):

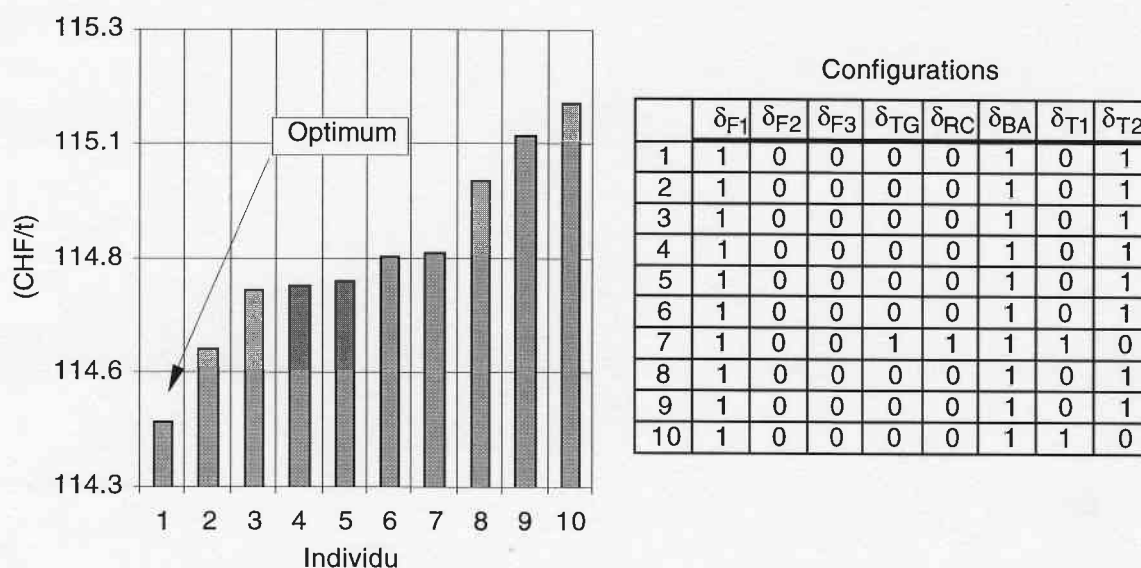


Figure 4.3 - Détails de la fonction objectif ( $C_{tpn}$ ) et des configurations des dix meilleures solutions (individus) de la dernière génération.

La figure 4.3 ci-dessus amène les commentaires suivants:

- Aucun équipement n'est acquis en cours de vie de la centrale.
- A part le septième individu la TG et le RC ne sont jamais sélectionnés.
- Un seul four est choisi, et le BA assure la disponibilité de puissance au niveau du réseau de chauffage à distance.
- Huit parmi les dix meilleurs configurations sont équipées de la ligne de turbine à vapeur à extraction (T2).

#### 4.1.2 Solution optimale

##### Variables indépendantes et dépendantes:

Les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 présentent, respectivement, les valeurs optimales des variables indépendantes ( $w$ ) du niveau structural (L1), celles des variables indépendantes ( $x$ ) du niveau opératoire (L2) et celles des variables dépendantes ( $y$ ) du niveau opératoire (L2).



Tableau 4.1 - Valeurs optimales des variables indépendantes de configuration-dimensionnement (**w**).

Variables entières ou binaires							
$\delta_{F1}$	$\delta_{F2}$	$\delta_{F3}$	$\delta_{TG}$	$\delta_{RC}$	$\delta_{BA}$	$\delta_{T1}$	$\delta_{T2}$
1	0	0	0	0	1	0	1
Variables réelles							
$\dot{m}_{BTG}$ (kg/s)	$\Pi_{TG}$ (-)	$\eta_{sKTG}$ (-)	$\eta_{sTTG}$ (-)	$\Delta T_{pinchRC}$ (K)	$x_{sout}$ (-)		
-	-	-	-	-	0.1158		
$\Delta T_{pinchCAD}$ (K)	$x_{T2HP}$ (-)	$\eta_{sT1}$ (-)	$p_{condT1}$ (bar)	$\Delta T_{pinchC1}$ (K)	$\eta_{sT2HP}$ (-)		
2.5	-	-	-	-	0.949		
$p_{extr}$ (bar)	$\eta_{sT2BP}$ (-)	$p_{condT2BP}$ (bar)	$\Delta T_{pinchC2}$ (K)	$x_f$ (-)	$n_{stock}$ (jours)		
2.29	0.949	0.17	14.77	0.958	15.5		

Dans les conditions thermoéconomiques définies par le scénario décrit au chapitre 3.6, la configuration optimale du système est composée d'un four d'incinération (F1), du boiler auxiliaire (BA) et de la turbine à extraction (T2). Tous les composants sont acquis à la date de construction planifiée de la centrale (tableau 4.1 et figure 4.7).

Tableau 4.2 - Valeurs optimales des variables indépendantes d'opération (**x**).

Groupe (gr)	1			2			3			4		
Années	2000 - 2005			2006 - 2011			20012 - 2017			2018 - 2024		
Séquence (k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Saison	H	M	E	H	M	E	H	M	E	H	M	E
$\delta_{TG}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\delta_{BA}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$x_{TG}$ (-)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$x_{BA}$ (-)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$x_{sout}$ (-)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$x_{T2HP}$ (-)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$p_{condT1}$ (bar)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$p_{extr}$ (bar)	1.84	1.86	1.97	1.61	1.9	2.2	1.65	2.07	2.25	1.67	2.08	2.29
$p_{condT2BP}$ (bar)	0.06	0.062	0.081	0.06	0.06	0.087	0.06	0.062	0.09	0.06	0.063	0.083

**Tableau 4.3 - Valeurs optimales des principales variables dépendantes d'opération (y).**

	Groupe (gr)	1			2			3			4		
	Années	2000 - 2005			2006 - 2011			2012 - 2017			2018- 2024		
	Séquence (k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Saison	H	M	E	H	M	E	H	M	E	H	M	E
F1	Charge (-)	0.89	0.89	0.89	0.99	0.99	0.99	1	1	1	1.02	1.02	1.02
	$\eta_{F1}$ (-)	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
	$\dot{m}_{vapF1}$ (kg/s)	9.34	9.34	9.34	10.47	10.47	10.47	10.77	10.77	10.77	10.94	10.94	10.94
BA	Charge (-)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\dot{m}_{vap}$ (kg/s)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T2HP	Charge (-)	0.95	0.95	0.95	1.07	1.07	1.08	1.07	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
	$\eta_{sT2HP}$ (-)	0.91	0.91	0.91	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
	$\dot{m}_{vapT2HP}$ (kg/s)	8.63	8.63	8.68	9.75	9.72	9.79	9.72	9.9	9.89	9.89	9.9	9.9
T2MP, T2BP	Charge (-)	0.77	0.82	0.86	0.69	0.83	0.95	0.72	0.86	0.98	0.74	0.88	1
	$\eta_{sT2BP}$ (-)	0.93	0.94	0.94	0.93	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.93	0.93
	$\dot{m}_{vapT2BP}$ (kg/s)	6.99	7.44	7.84	6.3	7.57	8.6	6.55	7.81	8.91	6.7	8.01	9.08
	$\dot{E}_{elT2}$ (MW)	8.11	8.28	8.39	8.72	9.16	9.48	8.79	9.37	9.66	8.97	9.44	9.76
C2	$\dot{E}_{elC2}$ (MW)	0.04	0.1	0.18	0.03	0.1	0.2	0.03	0.1	0.2	0.03	0.1	0.2
P2	$\dot{E}_{elP2}$ (kW)	8	9	10	8	10	11	9	10	11	9	10	11
CAD	$p_{sat}$ (bar)	1.01	1.01	1.01	1.05	1.02	1.01	1.05	1.02	1.01	1.05	1.02	1.01
P3	$\dot{E}_{elP3}$ (kW)	0.8	0.4	0.1	1.8	1.0	0.3	2.4	1.3	0.4	2.8	1.52	0.5
P4	$\dot{E}_{elP4}$ (kW)	71	71	71	80	80	80	83	83	83	84	84	84

### Analyse des choix optimaux de configuration, de dimensionnement et d'opérations (niveaux L1 et L2):

Les valeurs des variables indépendantes (**w**, **x**) ainsi que des principales variables dépendantes (**y**) d'opération sont fournies dans les trois tableaux ci-dessus.

Dans l'ensemble, les variables se trouvent relativement proche de l'optimum et permettent de se faire une idée suffisante, à ce stade, de l'allure de la solution optimale. Compte tenu des incertitudes des modèles, il n'est pas nécessaire, pour l'heure, d'investiguer plus profondément l'espace des solutions.

Four d'incinération (F1) et fosse à déchets (F):

Comme il n'y a qu'une seule ligne d'incinération, la charge de dimensionnement correspond à la charge maximale apparaissant sur l'horizon  $N_e$  (cf. figure 3.5). La variable de sous-dimensionnement du four ( $x_F$ ) permet de calculer la taille de l'incinérateur (cf. équation 3.59). Selon le tableau 3.11, la charge maximale survient au quatrième groupe de séquences (2018-2024). Grâce au sous-dimensionnement et à la présence d'une fosse de capacité de deux semaines, le four peut travailler de façon optimale d'un point de vue thermoéconomique.

Boiler auxiliaire (BA):

Si la taille du BA est marginale, comparée à celle du four ou de la TG, son rôle n'en est pas moins important et subtil: il permet de garantir une disponibilité minimale au niveau de la demande de chaleur du CAD ( $A_{CAD} \geq A_{CAD_{min}} = 0.99$ ) (cf. tableau 3.5) en jouant le rôle d'un groupe de secours<sup>48</sup>.

Le BA est dimensionné de façon à pouvoir garantir la demande de chaleur du CAD lorsque les autres équipements (F1, TG) sont en panne.

Turbine à vapeur (T2HP, T2BP):

La taille des turbines à vapeur est déterminée par la procédure décrite au chapitre 3.5.4 (équation 3.59). Au vu de la quantité variable des déchets sur l'horizon  $N_e$ , il est intéressant de sous-dimensionner quelque peu ces dernières<sup>49</sup>. Pour y parvenir, l'algorithme choisit, pour le dimensionnement (niveau L1), de soutirer une part non négligeable du flux de vapeur ( $x_{sout}$ ) (cf. tableau 4.1).

Sur le niveau opérationnel (L2) par contre, le flux de soutirage optimal dépend principalement de la charge des deux étages de turbine (rendements) et de la charge de l'aérocondenseur (C2). C'est la raison pour laquelle le flux de soutirage n'est pas forcément nul (cf. tableau 4.2)

---

<sup>48</sup> Notons que ce choix a été laissé libre à l'algorithme.

<sup>49</sup> A plus forte raison qu'en fonctionnement le rendement peut être supérieur au rendement nominal de dimensionnement [ABB, 1995].

La pression d'extraction ( $p_{\text{extr}}$ ) de dimensionnement est choisie le plus haut possible (cf. tableaux 4.1 et 3.6) de façon à minimiser le nombre d'étages de l'étage haute pression (T2HP), sous contrainte des régimes de fonctionnement (niveau d'optimisation L2). Pour les opérations, par contre, la pression d'extraction optimale correspond à celle qui permet de tirer le maximum de travail des étages T2HP, T2MP et T2BP, compte tenu des conditions d'écoulement (débit de vapeur dans l'étage T2HP, débit d'extraction) et des caractéristiques de fonctionnement des étages T2HP et T2MP et T2BP. Aussi longtemps que le débit dans la T2MP et T2BP n'est pas trop élevé, il est rentable d'abaisser la pression d'extraction (cf. tableaux 4.1 et 4.2). Par contre, à débit de vapeur plus élevé dans la T2MP et T2BP il faut augmenter légèrement la pression d'extraction ( $p_{\text{extr}}$ ) pour pouvoir faire passer le débit dans de bonnes conditions (cf. tableaux 4.1 et 4.2).

Les pressions de condensation ( $p_{\text{condT2BP}}$ ) optimales pour le dimensionnement (L1) et les opérations (L2) sont fortement corrélées. Les combinaisons optimales choisies sont celles qui présentent le meilleur compromis entre coûts d'investissement minimaux et production d'électricité maximale:

- Les coûts d'investissement pour la turbine et l'aérocondenseur sont inversement proportionnels à la pression de condensation (les autres paramètres étant fixés).
- Sur le niveau opératoire (L2), l'énergie électrique produite dans la turbine est, jusque dans certaines limites (conditions d'écoulement, caractéristiques de fonctionnement), inversement proportionnelle à la pression de condensation. La consommation des ventilateurs de l'aérocondenseur est proportionnelle au cube du débit d'air de refroidissement (donc du palier de condensation) [Olsommer, 1998].

Comme attendu, la pression optimale de dimensionnement est supérieure aux paliers optimaux de condensation du niveau opératoire (cf. tableaux 4.1 et 4.2). Il est également intéressant de noter que les paliers de pression du niveau opératoire sont fonction de la charge de l'étage moyenne et basse pression (T2MP, T2BP) et de la saison (température extérieure de l'air de refroidissement) (cf. tableau 4.3).

#### Aérocondenseur (C2):

Pour un palier de condensation donné et des conditions de température de l'air ambiant fixées, le coût d'achat de l'aérocondenseur est proportionnel au pincement ( $\Delta T_{\text{pinchC2}}$ ) pour la surface d'échange et inversement proportionnel au pincement pour les ventilateurs. En mode opératoire (niveau L2), plus le pincement (calculé) est

faible (pour un palier de condensation donné), plus le débit d'air est faible et moins le ventilateur consomme d'énergie. Ainsi, pour un palier de condensation donné, la valeur optimale du pincement de dimensionnement ( $\Delta T_{\text{pinch}_{C2}} = 14.77 \text{ (K)}$ ) consiste à légèrement surdimensionner les surfaces d'échange de l'aérocondenseur pour pouvoir le faire fonctionner avec moins d'air que nécessaire sur les différentes séquences (cf.  $\Delta T_{\text{pinch}_{C2}}$ , tableau 4.3).

#### Chauffage à distance (CAD):

Pour pouvoir satisfaire la demande pour les jours les plus froids, l'échangeur de chaleur du CAD doit être surdimensionné (cf. chapitre 3.5.4). Pour des niveaux de température de réseau déterminées, et compte tenu du surdimensionnement du CAD, le débit masse de vapeur (flux chaud) est inversement proportionnel au pincement ( $\Delta T_{\text{pinch}_{CAD}}$ ) de dimensionnement. Pour cette raison l'échangeur a tendance à être dimensionné avec des valeurs de pincement se situant vers la borne supérieure (cf tableau 3.6).

#### Pompes (P2, P3, P4) et bache alimentaire (BAI):

Les pompes d'extraction (P2, P3) et d'alimentation (P4) ainsi que la bache alimentaire (BAI) sont des éléments marginaux, aussi bien du point de vue des investissements que de la consommation énergétique (cf. figure 4.7 et tableau 4.3). Pour cette raison, ils n'influencent que très peu l'optimisation.

#### Remarques:

- L'efficacité globale du cycle ( $\epsilon_{\text{glob}}$ ) n'est pas beaucoup plus élevée que l'efficacité électrique ( $\epsilon_{\text{el}}$ ) (figure 4.4).
- Il est intéressant de noter que l'efficacité électrique fluctue entre les saisons, mais ne s'accroît pas forcément de l'hiver à l'été. Ce fait est le résultat combiné de la diminution des besoins en chaleur entre l'hiver et l'été, ainsi que de l'augmentation de la température ambiante ( $T_{\text{ext}}$ ) (charge de la T2BP, consommation énergétique de l'aérocondenseur).

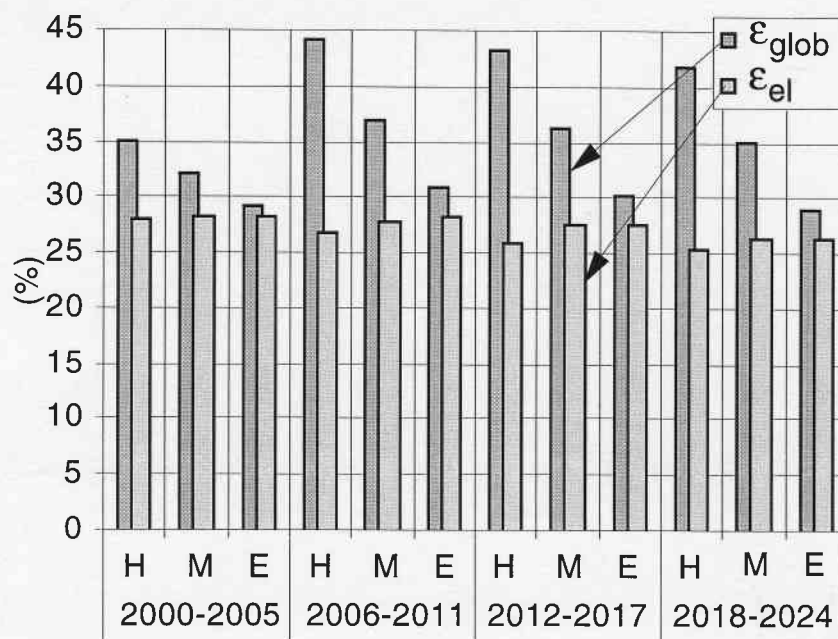


Figure 4.4 - Efficacité globale ( $\epsilon_{glob}$ ) et efficacité électrique du cycle ( $\epsilon_{el}$ )<sup>50</sup>  
(niveau L2).

(H=hiver, M=mi-saison, E=été)

#### Analyse des coûts totaux présents nets ( $C_{tpn}$ ):

**Remarque:** Malgré tous les efforts consentis pour l'élaboration du modèle économique, et particulièrement pour la partie concernant les coûts d'investissement, le type de modélisation utilisée ici ne permet pas de fournir avec précision quel sera le coût d'un système. En effet, l'approche, basée sur des fonctions corélées à diverses bases de donnée du marché, a pour objectif de dégager des tendances et des sensibilités à divers paramètres de dimensionnement. Il est important de garder à l'esprit qu'une procédure d'optimisation est un processus relatif, consistant à comparer des alternatives entre elles. Dans cette optique, le modèle thermoéconomique utilisé ici a tout son sens. Par contre, il ne s'agit en aucun cas de l'utiliser comme un méthode de calcul des coûts.

Les coûts de traitement atteints par l'optimisation ( $C_{tpn}=114$  (CHF/t)) (figure 4.5) sont nettement inférieurs à ceux de centrales à cogénération classiques. A titre de comparaison, le coût moyen de traitement des déchets en Suisse est de 187 (CHF/t)

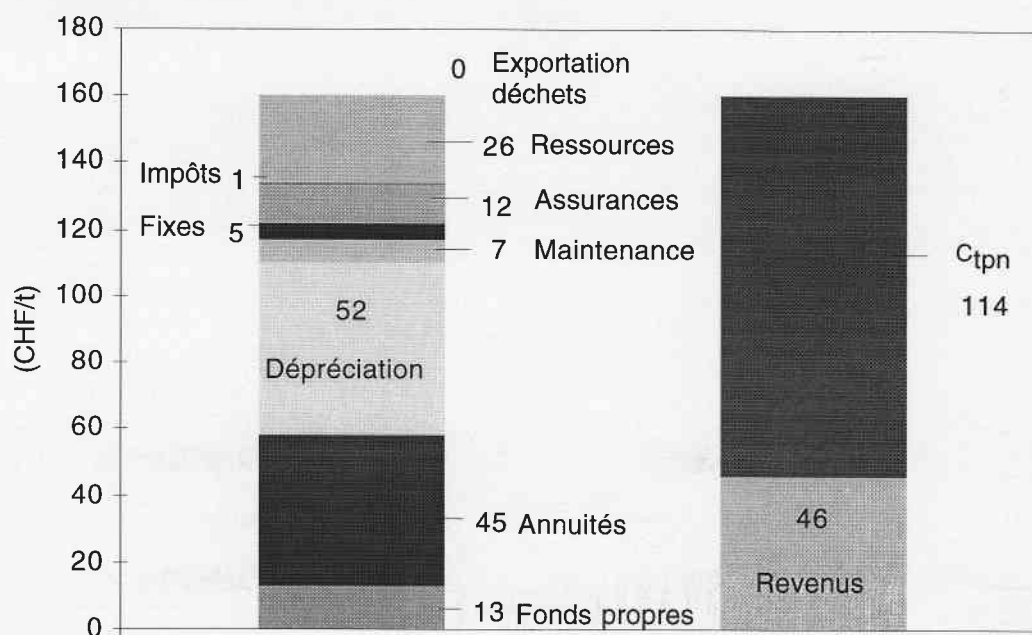
<sup>50</sup> Au sens du 1er Principe de la thermodynamique.

[OFEFP, 1996]. Les figures 4.5 et 4.6 présentent la distribution des coûts totaux présent nets. Dans le cas optimisé, les revenus représentent 22 (%) des dépenses<sup>51</sup> des coûts totaux présents nets.

- Les frais financiers (fonds propres, annuités et coûts associés à la dépréciation) représentent 110 (CHF/t) soit 69 (%) des dépenses des coûts totaux présents nets.
- Les coûts des ressources se composent presque exclusivement des coûts d'achat de produits pour le traitement des déchets, mais également de coûts d'achat de mazout léger pour le boiler auxiliaire (cf. tableau 4.4).
- La vente de chaleur est marginale dans le bilan financier de l'usine, dans la mesure où elle ne représente approximativement que 3.8 (%) des revenus (cf. tableau 4.4), soit une économie d'environ 1.8 (CHF/t).
- 96.2 (%) des revenus sont dus à la vente d'électricité, soit environ 44.2 (CHF/t).
- Les autres coûts (impôts, assurances, maintenance et coûts fixes) représentent environ 15 (%) des dépenses.
- Les coûts liés à l'exportation des déchets sont nuls grâce à la grande capacité de la fosse à déchets.

---

<sup>51</sup> Les dépenses comprennent tous les coûts sauf les revenus et sauf les coûts totaux présents nets ( $C_{tpn}$ ) (i.e. colonne de gauche dans la figure 4.5).



Tonnage annuel moyen : 88000 (t)

Figure 4.5 - Composition des coûts totaux présents nets ( $C_{tpn}$ ):  
colonne de gauche: dépenses; colonne de droite: revenus et  $C_{tpn}$ .

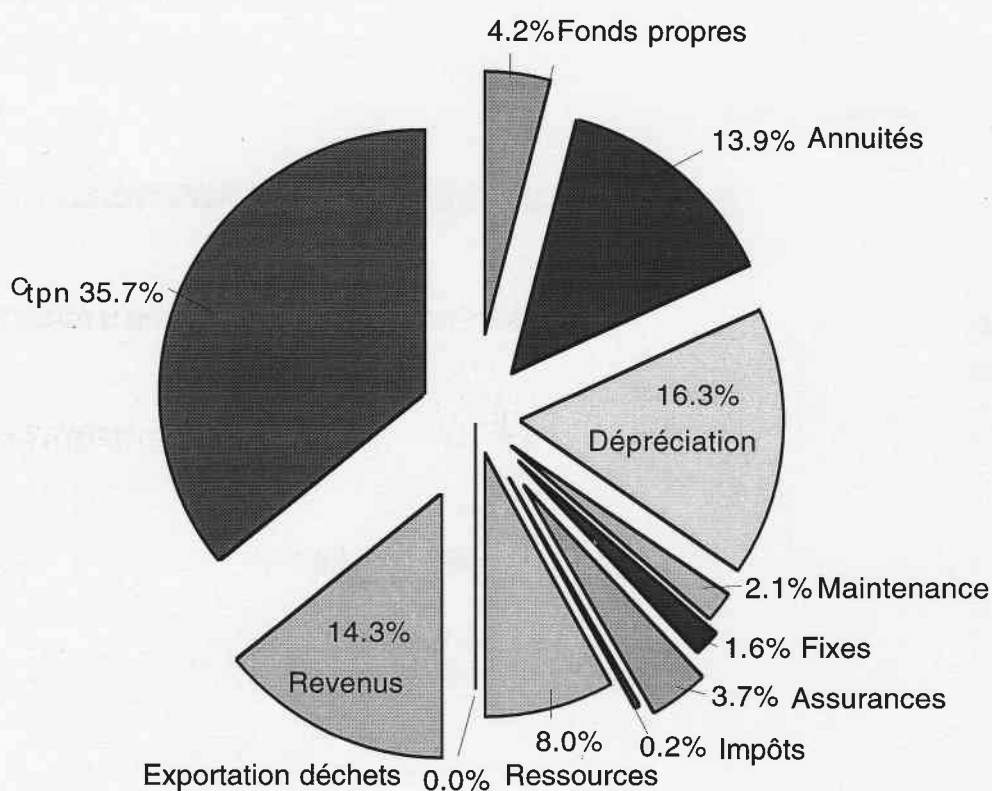


Figure 4.6 - Composition relative des coûts totaux présents nets ( $C_{tpn}$ ).



La figure 4.7 permet de se faire une idée du poids de chaque investissement. Avec un total de déchets incinérés de 2.12 (Mios t), les investissements représentent environ 140 (Mios CHF/t). Le four et son système de dépollution représentent à eux seuls 73 (%) de l'électromécanique (tous les coûts sauf les coûts initiaux de terrains, de préparation et de bâtiment ( $C_{BTP_{t=0}}$ ), et sauf les coûts initiaux d'honoraires ( $C_{H_{t=0}}$ ) (cf. chapitre 3.2.4)).

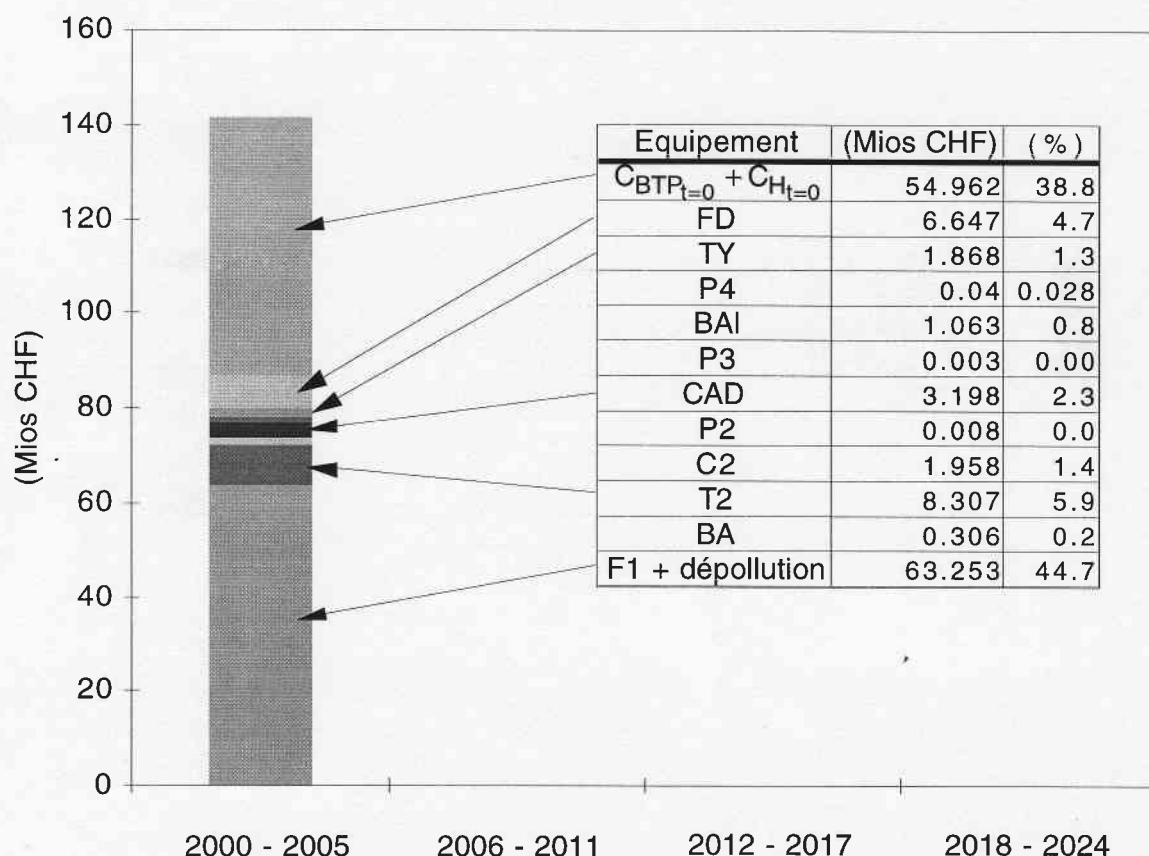


Figure 4.7 - Composition et échelonnement dans le temps des divers investissements.

Tous les investissements sont faits en début de vie de la centrale. Les raisons à cela sont:

- l'hypothèse que les investissements doivent être remboursés en fin de vie économique de la centrale ( $N_e=25$  ans) [Olsommer, 1998];
- l'hypothèse d'une valeur de sauvetage nulle (cf. tableau 3.1);
- les économies d'échelles très marquées pour les coûts d'achat de certains équipements clés (les fours notamment);

- les paramètres économiques et énergétiques qui ne fluctuent pas suffisamment pour justifier des investissements différés dans le temps.

La figure 4.8 présente les coûts totaux nets (non actualisés) pour chaque groupe de séquences.

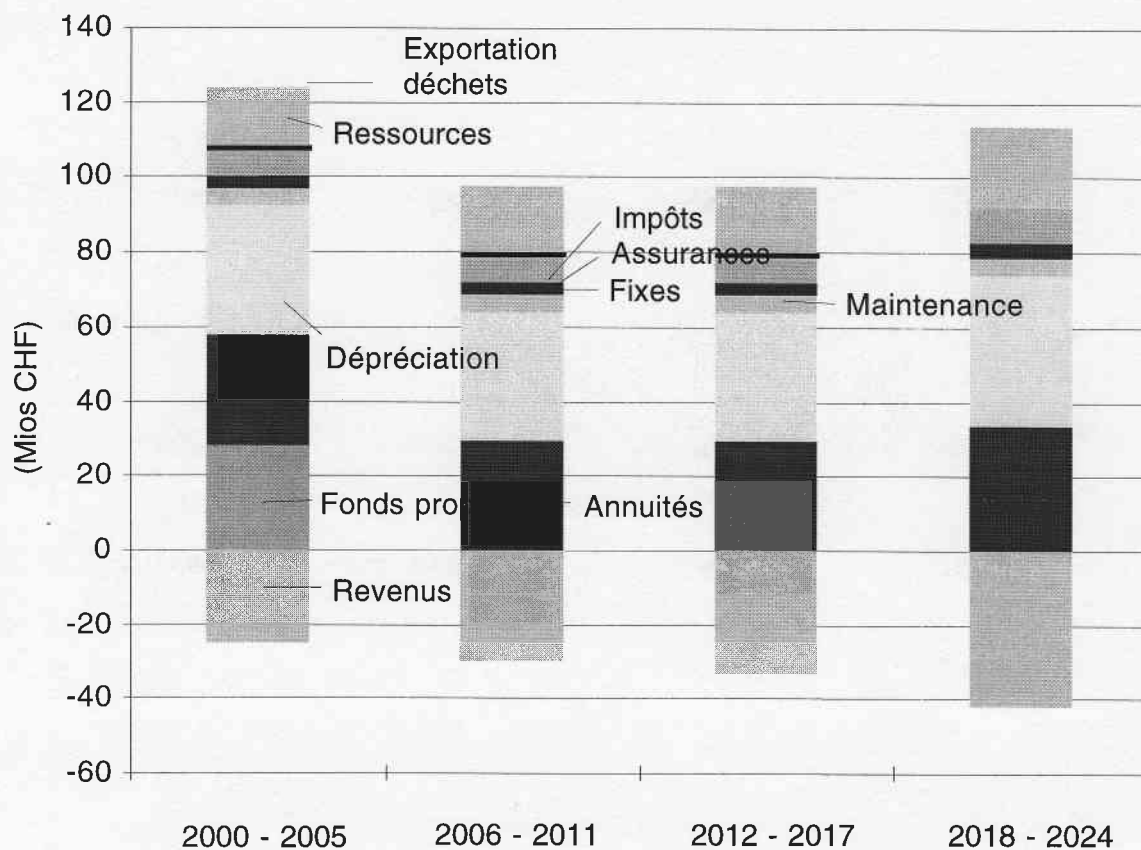


Figure 4.8 - Composition des coûts totaux nets sur chaque groupe de séquences.

Le tableau 4.4 présente les coûts opératoires (niveau L2) optimaux du système sur les diverses séquences. A cause de la fluctuation des coûts de vente de l'électricité, les coûts opératoires peuvent fluctuer dans un rapport de 1:20 d'une saison à l'autre.

Tableau 4.4 - Détail des différentes contributions des coûts opératoires (fonction objectif du niveau d'optimisation L2) sur les diverses séquences<sup>52</sup>.

Groupe (gr)	1			2			3			4		
Années	2000 - 2005			2006 - 2011			2012 - 2017			2018 - 2024		
Séquence (k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Saison	H	M	E	H	M	E	H	M	E	H	M	E
Coûts opératoires <sup>53</sup>	-383	-196	-19	-472	-262	-52	-545	-322	-86	-641	-385	-125
Vente électricité	-692	-513	-342	-784	-598	-406	-865	-668	-452	-971	-742	-502
Vente CAD	-17	-9	-3	-50	-26	-8	-54	-28	-8	-56	-29	-9
Combustible TG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Combustible BA	6	6	6	6	6	6	7	7	7	8	8	8
Exportation déchets	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Disponibilité CAD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Produits déchets	320	320	320	356	356	356	367	367	367	378	378	378

<sup>52</sup> Tous les coûts opératoires sont en (CHF/h).

<sup>53</sup> Fonction objectif du niveau opératoire (L2):  $\hat{C}_k$ ,  $k \in [1, \dots, 12]$ , en (CHF/h). Un coût négatif représente en fait un gain pour la centrale.

## 5. CONCLUSION

### 5.1 Méthodologie:

Les méthodes d'intégration des systèmes et procédés industriels ont connu un formidable développement au cours des dernières décennies. Grâce notamment aux techniques modernes de la recherche opérationnelle et à la puissance accrue des ordinateurs, des problèmes réputés complexes voire impossibles à résoudre il y a une dizaine d'années peuvent être traités maintenant sans difficulté majeure.

A l'heure actuelle, malgré cet essor, malgré la pression des coûts toujours plus forte liée à la libéralisation des marchés, et malgré la prise de conscience des problèmes liés à notre environnement, force est de constater que ces outils ne sont que peu utilisés par l'industrie, notamment dans le secteur des systèmes énergétiques. La raison principale du manque de popularité de ces techniques est liée à la complexité des systèmes énergétiques: un modèle simplifié (de type boîte noire) n'est souvent pas satisfaisant pour mettre en évidence de façon réaliste certains paramètres physiques clés, typiquement non-linéaires. Or, jusqu'à récemment, les techniques d'intégration n'autorisaient d'envisager l'intégration de ces systèmes que par des approches basées sur des modèles de *représentation* (boîte noire).

La méthode développée dans [Olsommer, 1998] et utilisée dans le cadre de cette étude permet d'aborder le problème d'optimisation thermoéconomique simultanée de la configuration, du dimensionnement et des opérations de systèmes énergétiques à séquences (horizons) fixes. La méthode permet de tenir compte:

- de l'influence des décisions d'ordre structurel (configuration et dimensionnement) sur les décisions d'ordre opérationnel, et vice-versa;
- de la dépendance du temps de certains paramètres clés;
- du caractère flexible de la configuration des systèmes;
- du fonctionnement hors-nominal des composants du système;

- de la sûreté (disponibilité, fiabilité) de fonctionnement des systèmes.

Le modèle thermoéconomique agrège les modèle thermodynamique le modèle économique en une formulation unifiée qui permet de contrebalancer les considérations thermodynamiques et énergétiques en vue de prendre des décisions rationnelles (optimisation). Lorsque le temps intervient, il faut intégrer les coûts sur la durée de vie du système. Pour y parvenir, une approche consiste à décomposer l'horizon (durée de vie) en une série de séquences indépendantes.

La résolution du problème est basée sur une décomposition sur deux niveaux d'optimisation : le premier traite les aspects de configuration et de dimensionnement (niveau structurel) et le second, les aspects de gestion opératoire (niveau opérationnel).

Le problème est résolu au moyen d'algorithmes génétiques, qui constituent des outils très robustes et très puissants. A chaque choix de structure correspond K problèmes d'optimisation du niveau opérationnel. Ainsi la puissance de calcul est considérable et la résolution du problème ne peut être envisagée, à l'heure actuelle et pour des problèmes de la complexité de celui traité dans cette étude, que sur des machines massivement parallèle ou sur un ensemble de machines séquentielles (des PC, typiquement) mises en réseau.

## **5.2 Résultats de l'étude:**

Si les résultats n'ont pas la prétention de fournir la valeur exacte des coûts de traitement des déchets de la future installation du Châtillon, ils n'en font pas moins ressortir clairement un certain nombre de tendances et permettent de répondre aux interrogations du début :

- Il semble évident, au vu des résultats, qu'une seule ligne d'incinération soit nécessaire, en ayant recours à une fosse de taille suffisante. Il paraît qu'avec une capacité de stockage de 15 jours, il ne soit pas nécessaire d'avoir recours au dépannage inter-centrales. De plus le four peut être légèrement sous-dimensionné (~96 (%)).
- Définitivement, une seule ligne de turbine est nécessaire au cas où tous les équipements sont acquis en même temps. Dans ce contexte, une turbine à extraction de vapeur est préférable à une turbine à condensation, même si les différences ne sont pas très marquées.

- L'intégration d'une turbine à gaz dans un cycle combiné ne permet pas, à priori, d'améliorer sensiblement les performances économiques du système. Les raisons en sont dues principalement aux conditions de reprises du courant fixées dans le scénario, à l'absence de gazoduc à proximité immédiate de la centrale et à la taille maximale admise pour cet équipement, fixée dans le cahier des charges.
- Malgré les incertitude du modèle thermoéconomique, les coûts du système sont relativement modérés, comparativement aux moyennes suisses (en considérant une méthode de remboursement à annuités constantes ainsi que la constitution d'un fond de renouvellement des équipements devant permettre de dégager des fonds propres au montant égal à la somme des fonds propres initiaux et des subventions).

### 5.3 Perspectives:

Cette étude a été réalisée dans un laps de temps relativement court pour l'envergure des ambitions initiales. Si le modèle économique initial [Olsommer, 1998] a pu être enrichi par les données du projet, il ne serait pas inutile d'avoir accès à une plus large base de données pour le perfectionner encore.

Dans cette étude la liberté a été laissée à l'algorithme de choisir la date d'acquisition de la turbine à gaz. Dans ce cas, il est clair que la solution (avec TG) s'est orientée très clairement vers une acquisition en début de vie. Si pour des raisons politiques, de délais ou d'organisation, il n'était pas possible de construire le cycle combiné en même temps, il serait intéressant de vérifier, avant la construction de l'usine si deux lignes de turbines sont réellement nécessaires. Le modèle développé dans le cadre de ce travail pourrait idéalement servir à cette finalité.



## 6. Nomenclature

Ce chapitre présente la liste de tous les symboles utilisés dans ce rapport. Ils sont classés par ordre alphabétique selon les lettres latines, grecques, les indices et les symboles.

### Lettres latines

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unités</i>
A	disponibilité	-
A	surface	m <sup>2</sup>
a	taux de transition	-
AG	algorithme génétique	
BA	boiler auxiliaire	
BAI	bâche alimentaire	
BB	branch and bound	
$\dot{C}$	taux des coûts	CHF/s
C	aérocondenseur	
c	cout unitaire	CHF/kg, CHF/kWh
C	coûts	(CHF)
CAD	chauffage à distance	
C <sub>AE</sub>	coûts d'achat des équipements	CHF
C <sub>ass</sub>	coûts des assurances	CHF
C <sub>fix</sub>	coûts fixes	CHF
C <sub>BTP</sub>	coûts de bâtiment, de terrain et de préparation	CHF
C <sub>CTI</sub>	coûts associés au CTI	CHF
C <sub>d</sub>	constante de la loi du cône des débits	
C <sub>dep</sub>	coûts associés à la dépréciation	CHF
C <sub>H</sub>	coûts des honoraires	CHF
CHF	franc suisse	
C <sub>maint</sub>	coûts de maintenance	CHF
CPU	central processing unit	



$C_{res}$	coûts des ressources	CHF
$C_{rev}$	revenus	CHF
$C_{tax}$	impôts	CHF
CTI	capital total d'investissement	CHF
$C_{tpn}$	coûts totaux présent nets	CHF
d	distance	-
$\dot{E}$	puissance travail (mécanique ou électrique)	W
f	facteur	-
F	four d'incinération	
F	frontière	
$f_{corr}$	facteur de correction	-
FD	Fosse à déchets	
FRI	facteur de retour sur les investissements	-
FVP	facteur de valeur présente	
g	contrainte d'inégalité	
Gr	nombre de groupes de séquences	
h	contrainte d'égalité	
h	heure	h
h	part du $C_{CTI}$ empruntée	-
$I_{gr}$	nombre de séquences par groupe	
$i_h$	taux d'emprunt	-
$i_m$	taux du marché	-
$i_n$	taux d'inflation	-
$J_{gr}$	nombre de séquences dans une année	
$\mathcal{K}$	nombre d'équipements	
k, K	numéro, nombre de séquences	
L	expression logique	
L1	niveau structurel	
L2	niveau opérationnel	
$\dot{m}$	débit masse	kg/s
M	méga	$10^6$
MINLP	programmation non-linéaire mixte	
Mios	million	$10^6$
N	nombre d'années	an
$N_e$	durée de vie (horizon) économique	an
$n_{gen}$	nombre de générations	

$N_h$	durée de l'emprunt	an
$n_{pop}$	nombre d'individus	
$P$	fonction de pénalité	
$P$	pompe	
$p$	pression	Pa
$p_c$	probabilité de croisement	-
$PE$	processeur	
$p_m$	probabilité de mutation	-
$p_{sat}$	pression de saturation	Pa
$\dot{Q}$	puissance thermique	W
$RC$	récupérateur de chaleur	
$s$	part du $C_{CTI}$ subventionnée	-
$t$	temps	s
$t$	tonne	$10^3 \text{ kg}$
$T (\hat{T})$	température (surtempérature)	K
$T1$	turbine à condensation	
$T1BP$	partie basse turbine à condensation	
$T1HP$	partie haute turbine à condensation	
$T2$	turbine à extraction	
$T2BP$	partie basse pression turbine à extraction	
$T2HP$	partie haute pression turbine à extraction	
$T2MP$	partie moyenne pression turbine à extraction	
$TG$	turbine à gaz	
$T_{sat}$	température de saturation	K
$TY$	tuyauterie	
$w (w)$	variable indépendante de configuration dimensionnement (vecteur des)	
$x (x)$	variable indépendante d'opération (vecteur des)	
$x_{air}$	taux de dilution	$\text{kg}_{air}/\text{kg}_B$
$y (y)$	variable dépendante (vecteur des)	
$z (z)$	variable indépendante (vecteur des)	

**Lettres grècques**

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unités</i>
$\alpha$	flux de refroidissement (étages turbines TG)	-
$\alpha, \beta, \gamma$	coefficient de pondération (grappes)	-
$\beta$	degré de combustion	-
$\Delta$	distance phénotypique normalisée	-
$\delta$	variable discrète ou binaire	-
$\Delta p$	pertes de charge	Pa
$\Delta T_{lm}$	écart moyen logarithmique	K
$\Delta T_{pinch}$	pincement	K
$\varepsilon_{el}$	efficacité électrique (1er Principe)	-
$\varepsilon_{glob}$	efficacité globale (1er Principe)	-
$\gamma$	part du fonds à renouveler	-
$\gamma$	taux de défaillance à la sollicitation	-
$\eta$	rendement	-
$\eta_s$	rendement isentrope	-
$\dot{\Phi}_{reel} (\Phi_{reel})$	flux (quantité) réel (analyse de sûreté)	-
$\lambda$	excès d'air de combustion	-
$\lambda$	taux de défaillance	1/s
$\mu$	taux de réparation	1/s
$\Pi$	rapport de pression	-
$\rho$	masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	écart-type	-
$\Psi$	durée relative d'un séquence	-

**Indices**

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unités</i>
0	conditions de référence (T=25 (C), p=1.013 (bar))	
ass	assurances	
atm	atmosphérique	
B	combustible	
CC	chambre de combustion TG	
ch	chaudière	
ch_BAI	chauffage bâche alimentaire	
ch_vap_C1	chauffage vapeur condenseur 1	
ch_vap_C2	chauffage vapeur condenseur 2	
comb	combustion	
d	déchets	
dep	dépréciation	
depol	dépollution	
dim	dimensionnement	
disp	disponibilité	
e	eau	
e	économique	
ech	échangeur de chaleur (aérocondenseur)	
eco	économiseur	
el	électrique	
evap	évaporateur	
export	exportation (des déchets)	
ext	extérieur	
extr	extraction	
fan	ventilateur (aérocondenseur)	
fix	fixe	
glob	global	
h	emprunt	
hor	horizon	
in	entrée	
incin	incinérateur	
K	compresseur TG	
L	comburant	
m	marché (économique)	
m	mazout léger	

M&S	Marshall and Swift
maint	maintenance
mec	mécanique
nc	non-chauffage
obj	objectif
out	sortie
p	matière plastique
R	gaz de combustion
ref	référence
refr	refroidissement du CAD
res	ressources
rev	revenus
s	isentrope
sout	soutirage
stock	stock de déchets
surch	surchauffeur
T	turbine TG
tax	impôts
tn	totaux nets

### Symboles

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unités</i>
⊕	valeur positive	
\$	dollar	
d, δ, Δ	formes différentielles	

## 7. Bibliographie

- [1] ABB, 1995, ALPRO: Anlagenprogramm, ABB Kraftwerke A.G. (KWDT), Baden, Switzerland, 1995.
- [2] BCV, 1997, Communications, Banque Cantonale Vaudoise, Lausanne, 1997.
- [3] BEJAN A., Tsatsaronis, G., Moran M., 1996, Thermal Design and Optimization, Wiley, New York, 1996.
- [4] Boehm R.F., 1987, Design Analysis of Thermal Systems, John Wiley & Sons, 1987.
- [5] Bösiger B., Völgyi G., 1995, Incinération des ordures, Département d'électricité, EPFL, Lausanne, 1995.
- [6] Chemical Engineering, 1997, McGraw-Hill, 1997.
- [7] Clocksin W.F., Mellish C.S., 1981, Programming in prolog, Springer-Verlat, New York.
- [8] Curti, V., 1998, Modélisation et optimisation environomiques de systèmes de chauffage urbain alimentés par pompes à chaleur, Rapport de Thèse, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, 1998.
- [9] El-Sayed Y.M., Evans R.B., 1970, Trans. ASME, J. Eng. for Power, 92, 27, 1970.
- [10] El-Sayed Y.M., 1989, J. of Engineering Resources Technology, 111, 1989.
- [11] Evans R.B., 1961, "A Contribution to the Theory of Thermo-Economics", Master's Thesis, Department of Engineering, University of California at Los Angeles, December 1961 (also published in 1962 as Report No. 62-36 of the UCLA Department of Engineering).
- [12] Frangopoulos C.A., 1990, "Intelligent Functional Approach: A Method for Analysis and Optimal Synthesis-Design-Operation of Complex Systems", Proc. of A Future for Energy, pp. 805-815, Florence, June, 1990(a).

- [13] Frangopoulos C.A., 1990, "Optimization of Synthesis-Design-Operation of a Cogeneration System by the Intelligent Functional Approach", Proc. of A Future for Energy, pp. 597-609, Florence, June, 1990(b).
- [14] Frangopoulos C.A., 1991, "Comparison of Thermoeconomic and Thermodynamic Optimal Designs of a Combined-Cycle Plant", Proceedings of the Int. Conf. on the Analysis of Thermal and Energy Systems, Athens, Greece, June 3-6, 1991.
- [15] Gaggioli R.A., 1977, "Proper evaluation and pricing of "energy"", Proc. Intl. Conf. on Energy Use Management, II, 31, Pergamon, 1977.
- [16] GEDEL, 1993, TRIDEL, Devis général réactualisé, Ville de Lausanne, Service de l'Assainissement, 1993.
- [17] GEDEL, 1997, TRIDEL, Rapport d'analyse des offres, Ville de Lausanne, Service de l'Assainissement, 1997.
- [18] GEIMESA, 1998, Communications, Fribourg, 1998.
- [19] GOLDBERG D.E., Algorithmes génétiques. Exploration, optimisation et apprentissage automatique, Addison-Wesley France S.A., Paris, 1994.
- [20] GRÜNIGER T., WALLACE D., "Multimodal Optimization using Genetic Algorithms", MIT, to be published in 1997.
- [21] Ierapetritou M.G., Pistikopoulos E.N., Floudas C.A., 1995, "Operational Planning under Uncertainty", Computers Chem. Engng., Vol. 20, No. 12, pp 1499-1516, 1996.
- [22] Norme SIA, 1982, Les degrés-jours en Suisse, Recommandation 381/3, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 1982.
- [23] OFEFP, 1996, "Statistique des déchets, 1994", Documents Environnement N°52, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne, 1996.
- [24] Olsommer B., von Spakovsky M.R., Favrat D., 1997, "An Approach for the Time-Dependent Thermoeconomic Modeling and Optimization of Energy System Synthesis, Design and Operation", Proceedings of the International Conference on Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems (TAIES'97), pp. 321-339, Beijing, China, June 1997(a).

- [25] Olsommer B., von Spakovsky M.R., Techniques de modélisation et d'optimisation des systèmes énergétiques, Cours destiné aux étudiants en Génie mécanique, EPFL, Lausanne, 1997(b).
- [26] Olsommer B., Méthode d'optimisation thermoéconomique appliquée aux centrales d'incinération d'ordures à cogénération, Rapport de thèse, EPFL, Lausanne, 1998.
- [27] Olsommer B., von Spakovsky M.R., Favrat D., 1997, "An Approach for the Time-Dependent Thermoeconomic Modeling and Optimization of Energy System Synthesis, Design and Operation (Part I: Methodology)", soumis à Journal of Applied Thermodynamics, 1999(a).
- [28] Olsommer B., von Spakovsky M.R., Favrat D., 1997, "An Approach for the Time-Dependent Thermoeconomic Modeling and Optimization of Energy System Synthesis, Design and Operation (Part I: Reliability and Availability)", soumis à Journal of Applied Thermodynamics, 1999(b).
- [29] Olsommer B., von Spakovsky M.R., Favrat D., 1997, "An Approach for the Time-Dependent Thermoeconomic Modeling and Optimization of Energy System Synthesis, Design and Operation (Part I: Results and Discussions)", soumis à Journal of Applied Thermodynamics, 1999(c).
- [30] Pelster S., 1998, Environomic Modeling and Optimization of Advanced Combined Cycle Cogeneration Power Plants including CO<sub>2</sub> Separation, Ph.D. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne, Lausanne, 1998.
- [31] PETERS M.S., TIMMERHAUS K.D., 1990, Plant Design and Economics for Chemical Engineers, McGraw-Hill Book Co., N. Y., N.Y., 1990.
- [32] PROCACCIA H., AUFORT P., 1995, EIREDA European Industry Reliability Data Bank, Vol. 1&2, Crete University Press, Grèce, 1995.
- [33] SAIDEF: Société anonyme pour l'incinération des déchets du Canton de Fribourg, Analyse des offres pour les équipements électromécaniques, Fribourg, 1998.
- [34] SAIOD: Société anonyme pour l'incinération des ordures et déchets, 1997, Rapports annuels, Vol. 1990-1996, Cottendart, Suisse, 1997.



- [35] Strömberg, J., Learning from experiences with Gas-Turbine-Based CHP in Industry, CADDET, Netherlands, 1993.
- [36] Subrahmanyam S., Pekny J.F., Reklaitis G.V., 1994, "Design of batch chemical plants under market uncertainty", Ind. Engng. Chem. Res. 33, pp 2688-2701, 1994.
- [37] Tribus M., 1956, "Thermodynamic and Economic Considerations in the Preparation of Fresh Water from Sea Water", Department of Engineering Report No. 56-16, University of California.
- [38] Tsatsaronis G., and Pisa, J., 1994, "Exergoeconomic Evaluation and Optimization of Energy Systems: Application to the CGAM Problem," Energy: The International Journal, special edition, Vol. 19, No. 3, pp. 287-321, Pergamon Press, Great Britain, 1994.
- [39] Valero A., Serra L., Lozano M.A., Torres C., 1994, "Application of the Exergetic Cost Theory to the CGAM Problem," Energy: The International Journal, special edition, Vol. 19, No. 3, pp. 365-381, Pergamon Press, Great Britain, 1994.
- [40] VON SPAKOVSKY M.R., 1994, "Application of Engineering Functional Analysis to the Analysis and Optimization of the CGAM Problem", Energy: The International Journal, special edition, Vol. 19, No. 3, pp. 343-364, Pergamon Press, Great Britain, 1994
- [41] von Spakovsky M.R., 1997, "The Thermodynamic, Thermoeconomic and Environomic Modeling and Optimization of Energy Systems - Discussion and Applications" Entropie, No. 20, France, Paris, 1997.
- [42] Wallace D.R., Jakiela M.J., Wlowers W.C., 1996, "Design Search under Probabilistic Specifications using Genetic Algorithms", Computer Aided Design, Vol. 28, No. 5, pp 405-421, 1996.
- [43] White P.R., 1997, "Using Lifecycle Inventory to Plan Sustainable Solid Waste Management", Proceedings of the R'97 (Recovery, Recycling, Re-integration) International Congress, Vol. 2, pp.143-148, Genève, Switzerland, February 1997(c).

## Annexe A.I: Fonctions des coûts d'achat des équipements.

### a) Fours d'incinération:

Pour les incinérateurs, les corrélations sont valables sur l'intervalle  $0 \leq \dot{m}_d \leq 50$  (t/h) et sur  $0 \leq \dot{m}_{vap} \leq 50$  (t/h) pour les chaudières.

Année de référence pour l'indice de Marshall & Swift: 1997.

	Incinérateurs: $C_{AE_{F_{incin}}}$		
Nombre de lignes	1 ligne	2 lignes	3 lignes
$c_1$	10.01923	9.09186025	8.78109553
$c_2$	0.2665922	0.2665922	0.2665922

	Chaudières: $C_{AE_{F_{ch}}}$		
Nombre de lignes	1 ligne	2 lignes	3 lignes
$c_1$	1.0	0.96528185	0.96000597
$c_2$	0.16742715	0.11863012	0.08920571
$c_3$	0.65107304	0.64863361	0.64638101

### b) Système de dépollution:

Pour le système de dépollution, les corrélations sont valables sur l'intervalle  $0 \leq \dot{m}_R \leq 50$  (kg/s).

Année de référence pour l'indice de Marshall & Swift: 1997.

	$C_{AE_{Depol}}$
$c_1$	3.43632774
$c_2$	0.65101158

c) Turbine à gaz:

Pour les turbines à gaz, la corrélation est valable sur l'intervalle  $0 \leq \dot{E}_e \leq 50$  (MWél).

Année de référence pour l'indice de Marshall & Swift: 1996.

	$C_{AE_{TG}}$
$c_1$	26599.199103
$c_2$	0.823480475479
$c_3$	0.988986685985
$c_4$	0.311918037945
$c_5$	0.038554115501
$c_6$	11816.201588
$c_7$	1
$c_8$	0.095433912360
$c_9$	179.714735429660
$c_{10}$	37881.243308
$c_{11}$	0.746382891437
$c_{12}$	0.989858488102
$c_{13}$	0.227036981580
$c_{14}$	1
$c_{15}$	0.066957819750
$c_{16}$	156.156583224831
$c_{17}$	0.5
$c_{18}$	4000000.0

c) Turbines à vapeur:

Pour les turbines à vapeur, les corrélations sont valables sur l'intervalle  $0 \leq \dot{E}_{el} \leq 150$  (MWél).

Année de référence pour l'indice de Marshall & Swift: 1997.

	$C_{AE_{T1}}$	$C_{AE_{T2}}$
$c_1$	110 e-3	110 e-3
$c_2$	80 e6	80 e6
$c_3$	0.67	0.67
$c_4$	1	1
$c_5$	866.8	866.8
$c_6$	10.42	10.42
$c_7$	1	1.25

d) Bâche alimentaire:

Pour la bâche alimentaire, les corrélations sont valables sur l'intervalle  $0 \leq \dot{m} \leq 100$  (kg/s).

Année de référence pour l'indice de Marshall & Swift: 1979.

	$C_{AE_{BAI}}$
$c_1$	50117.65
$c_2$	0.78

e) Fosse à déchets:

Pour la fosse à déchets, les corrélations sont valables sur l'intervalle  $0 \leq \dot{m}_d \leq 5$  (kg/s).

Année de référence pour l'indice de Marshall & Swift: 1997.

	$C_{AE_{fosse}}$
$c_1$	5511685.0
$c_2$	29548.0
$c_3$	0.65
$c_4$	2208425.0

e) Tuyauterie:

Pour la tuyauterie, les corrélations sont valables sur l'intervalle  $0 \leq \dot{m}_{\text{vap}} \leq 60$  (kg/s).

Année de référence pour l'indice de Marshall & Swift: 1997.

	$C_{AE_{\text{tuy}}}$
$c_1$	504525.0
$c_2$	0.5

## Annexe A.II: Variables indépendantes de configuration-dimensionnement (L1) de la dernière génération

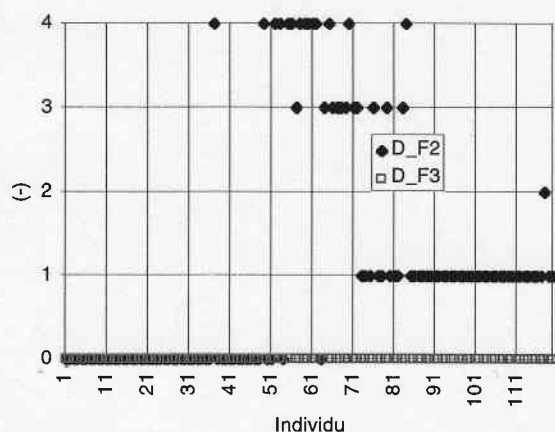


Figure A.II.1 - Date d'achat des fours (D\_F2,D\_F3).

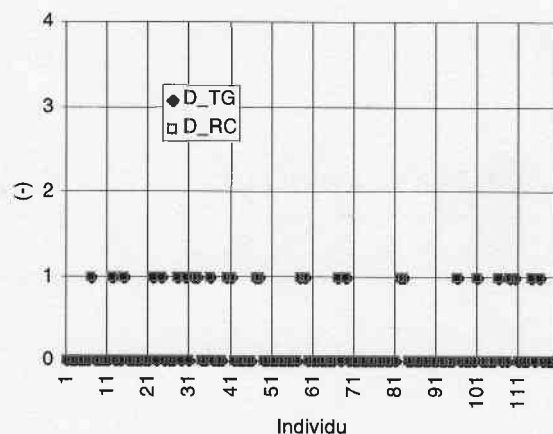


Figure A.II.2 - Date d'achat TG, RC (D\_TG, D\_RC).

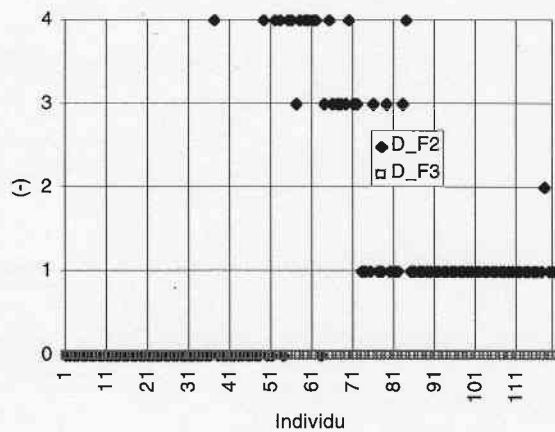


Figure A.II.3 - Date d'achat BA (D\_BA).

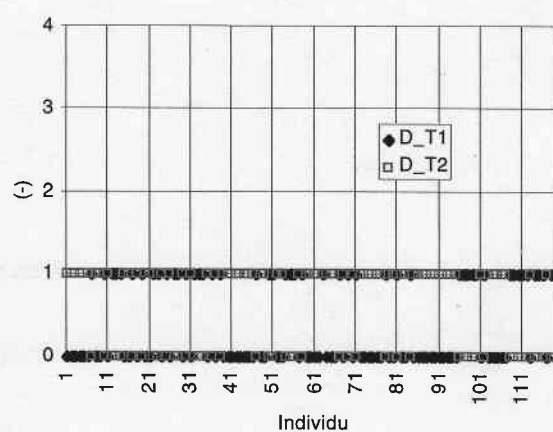
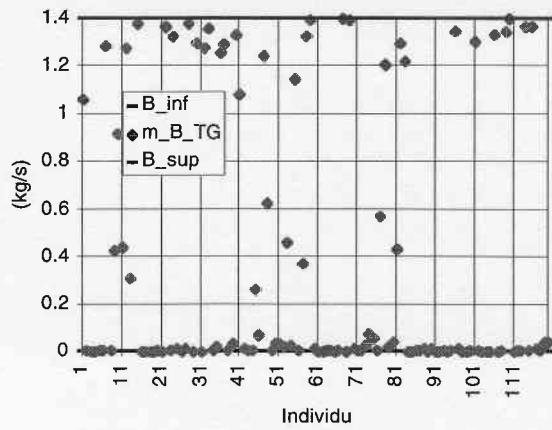
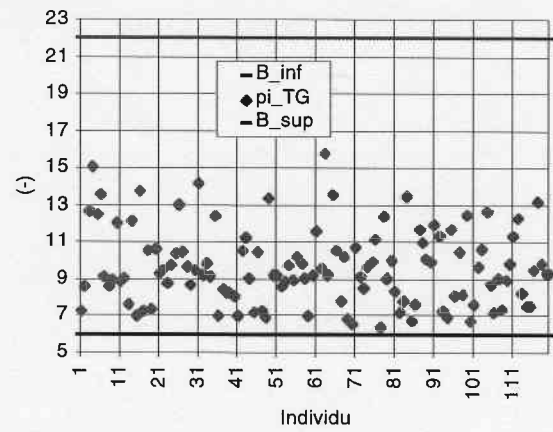
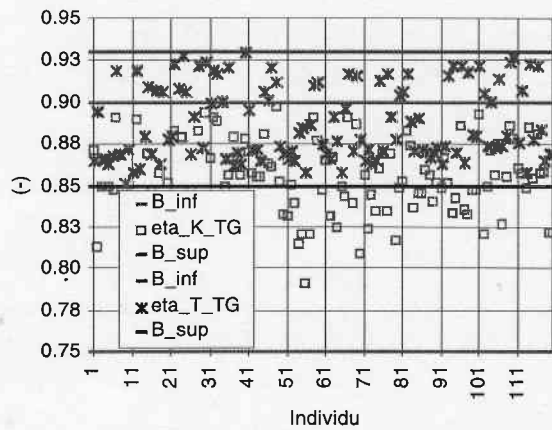
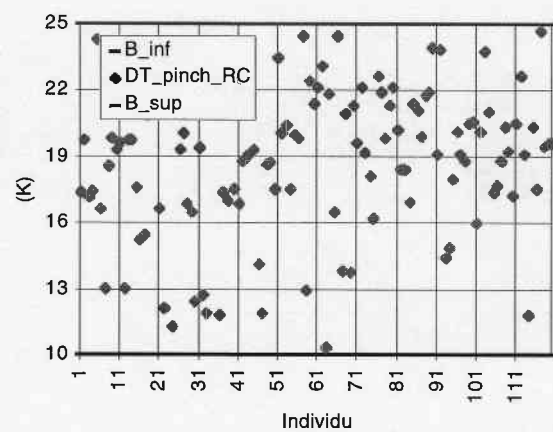
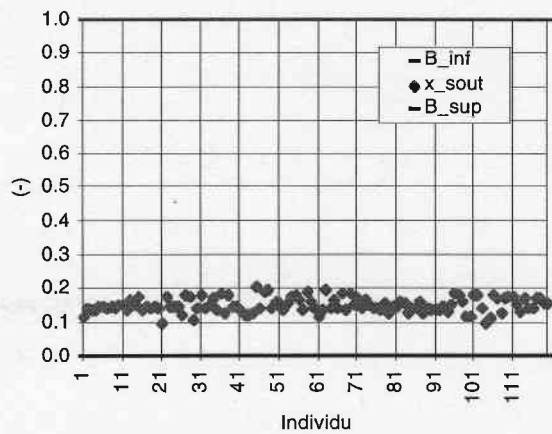
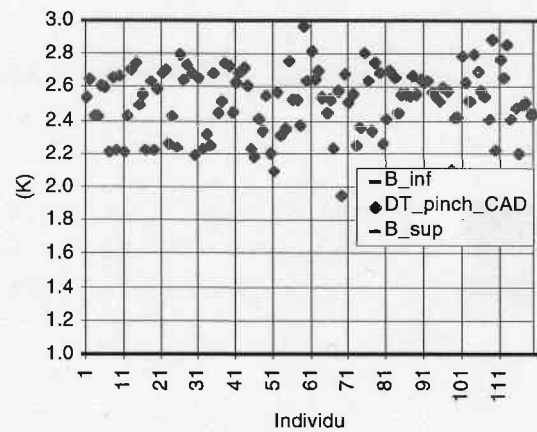
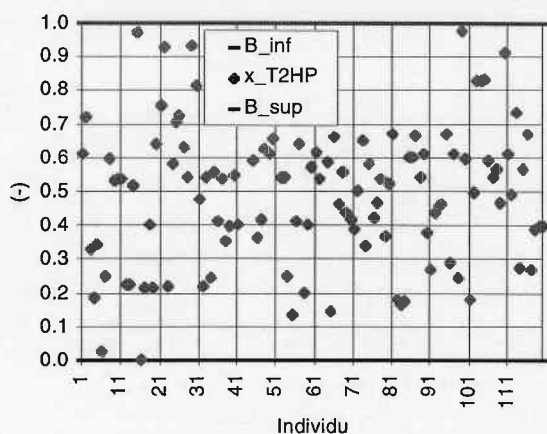
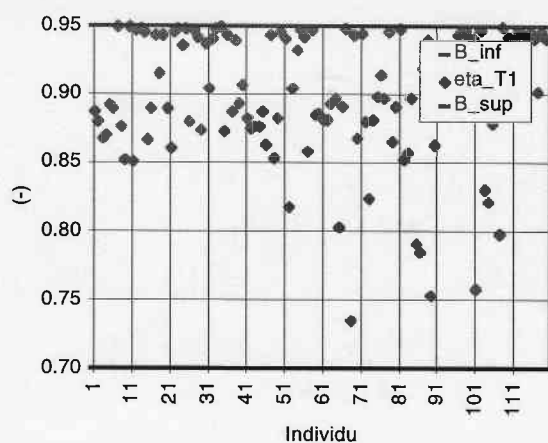
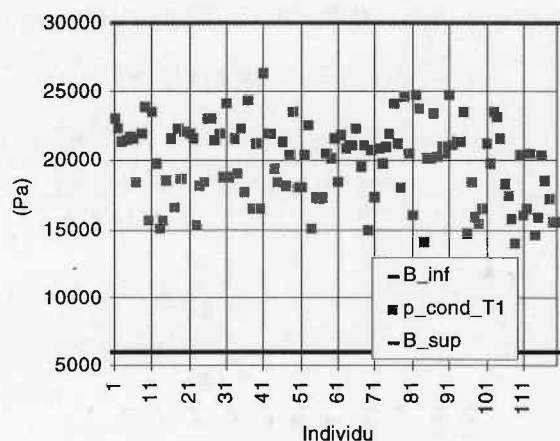
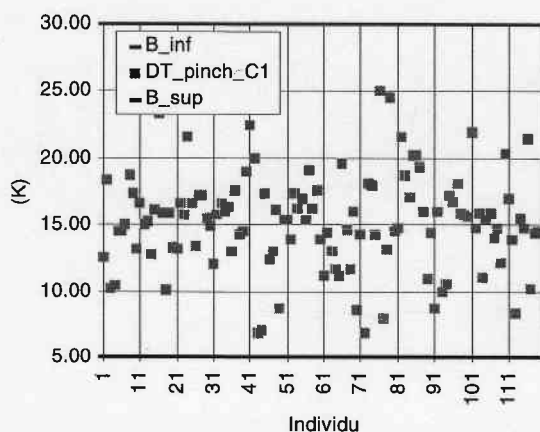
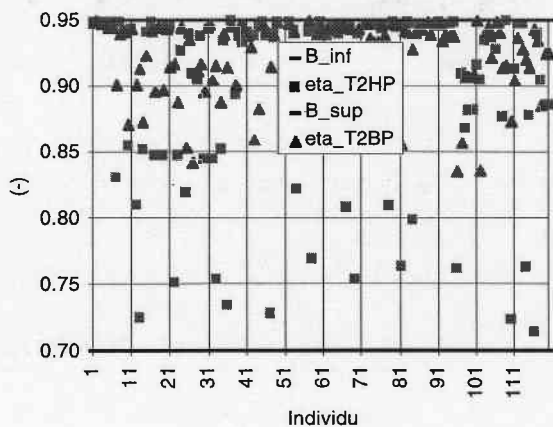
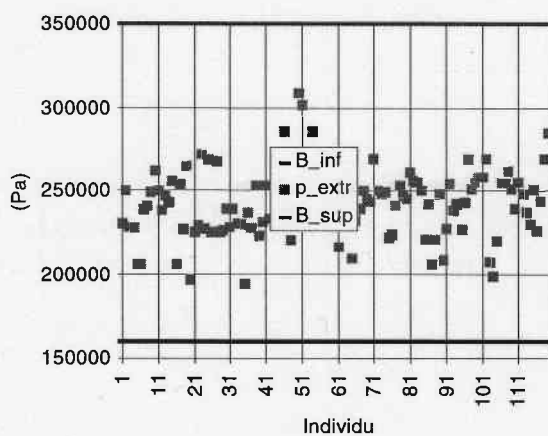


Figure A.II.4 - Date d'achat T1, T2 (D\_T1, D\_T2).

Figure A.II.5 - TG: combustible ( $m_{B\_TG}$ ).Figure A.II.6 - TG: rapport de pression ( $pi_{TG}$ ).Figure A.II.7 - TG: rendements isentropes compresseur ( $eta_{K\_TG}$ ) et turbine ( $eta_{T\_TG}$ ).Figure A.II.8 - RC: pincement ( $DT_{pinch\_RC}$ ).Figure A.II.9 - Soutirage haute pression ( $x_{sout}$ ).Figure A.II.10 - CAD: pincement ( $DT_{pinch\_CAD}$ ).

Figure A.II.11 - Répartition vers T2HP ( $x_{T2HP}$ ).Figure A.II.12 - T1: rendement isentrope ( $\eta_{T1}$ ).Figure A.II.13 - T1: pression condensation ( $p_{cond\_T1}$ ).Figure A.II.14 - C1: pincement ( $DT_{pinch\_C1}$ ).Figure A.II.15 - T2: rendements T2HP et T2BP ( $\eta_{T2HP}$ ,  $\eta_{T2BP}$ ).Figure A.II.16 - T2: pression extraction ( $p_{extr}$ ).



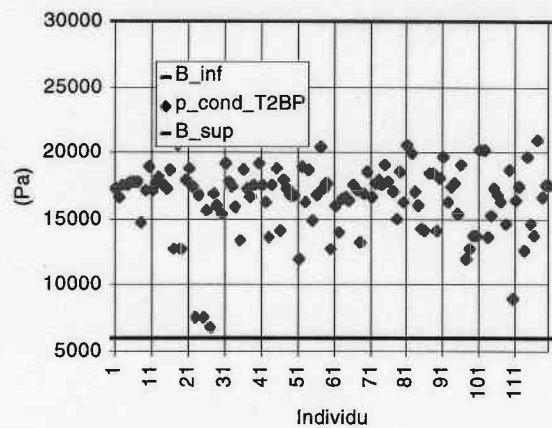


Figure A.II.17 - T2: pression condensation ( $p_{\text{cond\_T2}}$ ).

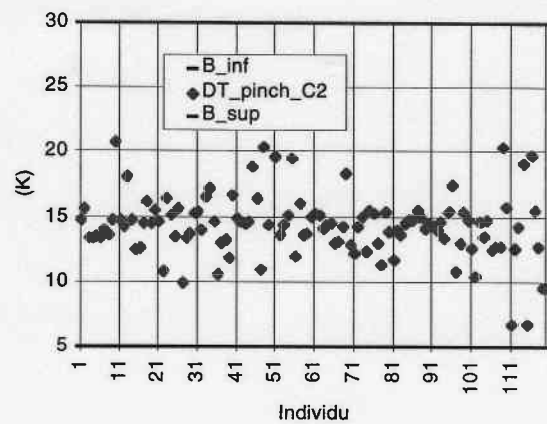


Figure A.II.18 - C2: pincement ( $DT_{\text{pinch\_C2}}$ ).

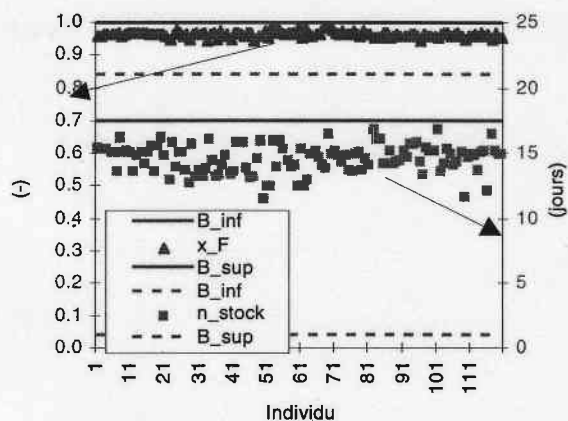


Figure A.II.19 – Sur(sous)dimensionnement des fours ( $x_F$ ), jours stockage déchets ( $n_{\text{stock}}$ ).